

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

re application of:

Koju OKAMOTO et al.

Appl. No. 09/955,155

Confirmation No. 8330

Filed: September 19, 2001

For: OPTICAL FIBER
INTERFEROSENSOR, SIGNAL-
PROCESSING SYSTEM FOR
OPTICAL FIBER
INTERFEROSENSOR AND
RECORDING MEDIUM

Art Unit: 2651

Examiner: Unassigned

Atty. Docket No. 36748-175097

Customer No.



26694

PATENT TRADEMARK OFFICE

Submission of Certified Copy of Priority Document

Assistant Commissioner for Patents
Washington, D.C. 20231

RECEIVED

DEC 20 2002

Technology Center 2600

Sir:

Submitted herewith is a certified copy of Application No. 2000-284624 filed on September 20, 2000, in Japan, the priority of which is claimed in the present application under the provisions of 35 U.S.C. 119.

Respectfully submitted,

Date:

12/19/2002

Andrew C. Aitken
Registration No. 36,729
VENABLE
P.O. Box 34385
Washington, D.C. 20043-9998

Telephone: (202) 962-4800
Telefax: (202) 962-8300

DEC 24 2002
TECHNOL. CENTER 2600



日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日
Date of Application:

2000年 9月20日

出 願 番 号
Application Number:

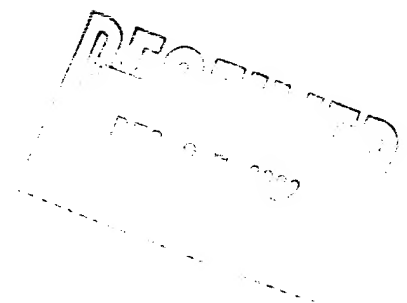
特願2000-284624

[ST.10/C]:

[JP2000-284624]

出 願 人
Applicant(s):

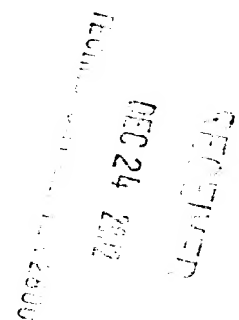
株式会社共和電業



RECEIVED

DEC 20 2002

Technology Center 2600



2002年11月22日

特 許 庁 長 官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田 信一郎

出証番号 出証特2002-3092623

【書類名】 特許願

【整理番号】 120164

【提出日】 平成12年 9月20日

【あて先】 特許庁長官 及川 耕造 殿

【国際特許分類】 G01B 9/02

【発明の名称】 光ファイバ干渉センサ、光ファイバ干渉センサの信号処理システム、信号処理方法および記録媒体

【請求項の数】 14

【発明者】

【住所又は居所】 東京都調布市調布ヶ丘3丁目5番地1 株式会社共和電業内

【氏名】 岡本 興司

【発明者】

【住所又は居所】 東京都調布市調布ヶ丘3丁目5番地1 株式会社共和電業内

【氏名】 廣瀬 浩二

【特許出願人】

【識別番号】 000142067

【住所又は居所】 東京都調布市調布ヶ丘3丁目5番地1

【氏名又は名称】 株式会社共和電業

【代表者】 寺野 健夫

【代理人】

【識別番号】 100082636

【住所又は居所】 東京都港区赤坂6丁目4番17号 赤坂コーポ306号

【弁理士】

【氏名又は名称】 真田 修治

【電話番号】 03(3586)6969

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 007113

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9714288

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光ファイバ干渉センサ、光ファイバ干渉センサの信号処理システム、信号処理方法および記録媒体

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 力、ひずみ、圧力および温度等の物理量により変動する被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を検出して、前記被計測間隙を求め、前記物理量の大きさを計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサにおいて、

前記低コヒーレンス光源として、波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段と、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段とを具備することを特徴とする光ファイバ干渉センサ。

【請求項 2】 力、ひずみ、圧力および温度等の物理量により変動する被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を検出して、前記被計測間隙を求め、前記物理量の大きさを計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサにおいて、

前記低コヒーレンス光源として、波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段と、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理手段と、

前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段と

を具備することを特徴とする光ファイバ干渉センサ。

【請求項 3】 前記広帯域光源は、ハロゲンランプおよび白色発光ダイオードのうちのいずれかであることを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載の光ファイバ干渉センサ。

【請求項 4】 前記光相関信号抽出手段は、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するバックグラウンド信号除去手段を含むことを特徴とする請求項 1 ～請求項 3 のうちのいずれか 1 項に記載の光ファイバ干渉センサ。

【請求項 5】 前記バックグラウンド信号除去手段は、最小二乗多項式フィッティングによりバックグラウンド信号を推定して、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含むことを特徴とする請求項 4 に記載の光ファイバ干渉センサ。

【請求項 6】 前記バックグラウンド信号除去手段は、所要の計測範囲に光相関信号を含まない状態での実測生データをバックグラウンド信号として、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含むことを特徴とする請求項 4 に記載の光ファイバ干渉センサ。

【請求項 7】 前記極値位置算出手段は、

前記光相関信号を多項式適合平滑化法に基づいて平滑化微分処理する平滑化微分処理手段と、

前記平滑化微分処理手段の出力がレベル零と交わる零クロス点を求める零クロス点算出手段と

を含むことを特徴とする請求項 1 ～請求項 6 のうちのいずれか 1 項に記載の光ファイバ干渉センサ。

【請求項 8】 前記高周波成分除去処理手段は、ローパスフィルタを含むことを特徴とする請求項 2 に記載の光ファイバ干渉センサ。

【請求項 9】 被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、

前記低コヒーレンス光源として波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段と、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段と
を具備することを特徴とする光ファイバ干渉センサの信号処理システム。

【請求項 10】 被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、

前記低コヒーレンス光源として波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、
且つ、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関
信号抽出手段と、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分
を除去する高周波成分除去処理手段と、

前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光
相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出
手段と

を具備することを特徴とする光ファイバ干渉センサの信号処理システム。

【請求項 1 1】 被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を
対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセン
サ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス
光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間
隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバに
て導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最
小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロ
ー型の光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関
信号抽出ステップと、

前記光相関信号抽出ステップで抽出された光相関信号から、該光相関信号にお
ける最小または最大位置を求める極値位置算出ステップと

を有することを特徴とする光ファイバ干渉センサの信号処理方法。

【請求項 1 2】 被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を
対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセン
サ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス
光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間
隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバに
て導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最

小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出ステップと、

前記光相関信号抽出ステップにより抽出される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理ステップと、

前記高周波成分除去処理ステップにより高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出ステップと

を有することを特徴とする光ファイバ干渉センサの信号処理方法。

【請求項 1 3】 被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理にあたり、コンピュータを、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段、および

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段

として機能させるためのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【請求項 1 4】 被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバに

て導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理にあたり、コンピュータを、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理手段、および

前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段として機能させるためのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て、該光強度信号における光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサに係り、特に起歪部の変位により被計測間隙が変化する光ファイバ干渉ひずみセンサ等に好適な信号処理を行なう光ファイバ干渉センサ、光ファイバ干渉センサの信号処理システム、信号処理方法および記録媒体に関するものである。

【0002】

【従来技術】

広帯域スペクトルを有する低コヒーレンス光源、つまり多波長の白色光源、を用いた光ファイバ干渉センサは、レーザ光源のような高コヒーレンス光源を用い

た光ファイバ干渉センサにはない特徴をもっている。

低コヒーレンス干渉法は、例えば、M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics, 6th edition", (Pergamon Press, (Oxford, London, New York, 1980)) に記載されているように、古典光学では周知の技術である。しかしながら、この手法は、光ファイバセンサへの応用においてその真価が発揮される。

また、低コヒーレンス干渉法を光ファイバセンサに応用したものは、例えば、D. A. Jackson, "Monomode optical fibre interferometers for precision measurement", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 18 981-1001 (1985) の総合報告等に記述されている。

【0003】

低コヒーレンス干渉法に対して、高コヒーレンス干渉法は、レーザの発展と共に進歩し、高精度な計測が実現されている。この高コヒーレンス干渉法においては、基本的にフリンジをカウントすることにより位相差、つまり光路差、を測定する。このため、計測システムがオフになるとそれまでの情報は失われてしまい、絶対的な光路差を求めることができない。

また、高コヒーレンス干渉法は、光源であるレーザの波長を基準としている。したがって、高コヒーレンス干渉法においては、レーザ波長の高安定化を図らなければ、高精度の計測を実現することはできない。

それに対して、低コヒーレンス干渉法は、干渉計の絶対光路差を測定することができ、しかも光源の波長スペクトルの変動に影響されにくいという、高コヒーレンス干渉法にはない特徴を有している。この方式は、測定対象パラメータが変位に変換できるものでさえあれば、多くの物理量に適用することができ、その絶対測定を可能にする。

【0004】

すなわち、低コヒーレンス干渉法は、干渉法の持つ性質を活かしつつ、高コヒーレンス干渉法におけるフリンジ次数同定の困難さ、および光源の安定性にかか

わる問題を克服した高精度な計測方法である。

低コヒーレンス光源を用いた光ファイバ干渉センサの中で、ファブリペロー型光ファイバ干渉センサは、その構造が単純であるため、高精度センサに適している。

従来、低コヒーレンス光源を用いたファブリペロー型光ファイバ干渉センサとしては、例えば米国特許第 5, 392, 117 号公報（1995 年 2 月 21 日発行；Belleville et al., “Fabry-Perot optical sensing device for measuring a physical parameter”）および米国特許第 5, 202, 939 号公報等に、センサにおいて波長変調されたセンサからの信号光を空間的に直線状に集光し、その光信号をフィゾー干渉計に導き、フィゾー干渉計において光相関を生じさせて光信号を復調し、それをリニアイメージセンサで検出する光ファイバ・ファブリペロー型干渉ひずみセンサシステムが示されている。

【0005】

前述の米国特許第 5, 392, 117 号公報に開示されたファブリペロー型光ファイバ干渉ひずみセンサシステムの一例について説明する。

図 12 にファブリペロー型光ファイバ干渉ひずみセンサの概略的な構成を示す。図 12 (a) は、ファブリペロー型光ファイバ干渉ひずみセンサの全体の構成および図 12 (b) は、測定システムの概要を示している。

ファブリペロー干渉計は、図 13 に示すように、所定のギャップの間隙寸法 d ($=G$) を有して相対峙する一対の平行平面に光の部分反射膜 F1 および F2 を形成し、そのギャップ内で繰り返し反射することによる多重反射を行わせるようにしたもので、多数の光束が干渉に関与する（多重光束干渉）ため、光波の波長選択性が高くなる。なお、後述する本発明もこの性質を積極的に利用している。ここで、ギャップの間隙 d は、使用する光源に対して透明な真空あるいは、例えば空気等の媒質で満たされている。

【0006】

以下、ファブリペロー型光ファイバ干渉ひずみセンサの構造について説明する。

ひずみセンサは、図 1 2 (a) に示すように、ギャップの間隙寸法 $G (= d)$ を隔てて対峙した光ファイバ 1 0 1 および 1 0 2 の各端面に部分反射ミラーを形成する薄膜からなる部分反射膜 F 1 および F 2 が成膜された基本構造を有している。また、センサ部 1 0 0 において対峙した光ファイバ 1 0 1 および 1 0 2 は、マイクロキャピラリチューブ 1 0 3 中に挿入され、所定の間隙寸法 G のギャップを存して配置され、ゲージ長さ L_G に対応する部分でマイクロキャピラリチューブ 1 0 3 に融着されている。

ファブリペロー型光ファイバー干渉ひずみセンサを構成するマイクロキャピラリチューブ 1 0 3 を測定対象物に接着材等で固定すると、測定対象物の変形によりゲージ長さ L_G が変化し、それに対応してギャップの間隙寸法 G が変化する。その間隙寸法 G の変化から測定対象物のひずみを測定することができる (図 1 4 および図 1 6 参照。)。また、広波長帯域を有する低コヒーレンス光源を用いるため、光ファイバ 1 0 1 および 1 0 2 には、マルチモード光ファイバを使用する。

センサ部 1 0 0 において波長変調された反射および透過いずれの光波も信号光として使用することができるが、ここでは反射光を例にとって説明する。

センサ部 1 0 0 から反射して戻ってきた波長変調された光波は、 $[2 \times 2]$ カプラ 1 0 7 により分岐され光信号復調処理部 1 0 8 に伝播する。

【0 0 0 7】

次に、図 1 4 を参照して、この種のファブリペロー型光ファイバー干渉ひずみセンサの検出原理を説明する。

波長変調され、センサ部 1 0 0 から光信号復調部 1 0 8 に伝播した信号光は、光ファイバ 1 0 2 から空間に放射され、例えばコリメートレンズ系および集光レンズ系からなる光学系 1 0 8 a によりコリメートされた後に直線状 (平行光線状) に集光される。

直線状に集光された光信号は、対向する面が微小角度 γ だけ傾いているウェッジ型ファブリペロー干渉計、すなわちフィゾー干渉計 1 0 8 b のテーパ状をなすギャップの各位置において、前述のセンサ部 1 0 0 の場合とほぼ同様に多重反射し、フィゾー干渉計 1 0 8 b の波長スペクトル特性との光相関を生じ、センサ部

100のギャップの間隙寸法Gに一致するフィゾー干渉計108bのギャップ寸法の位置で光強度が最小となる（透過型の場合は最大、反射型の場合は最小となる）。

【0008】

この光強度信号を、例えばCCD（電荷結合素子）等からなるリニアイメージセンサ108cで検出し、図14に示すように、その光強度が最小となる個所のウェッジ端からの距離 $[L_{\min}(d) |_{d=G}]$ を求めることにより、 $[G = L_{\min}(G) \cdot \tan(\gamma)]$ として、センサ部100のギャップの間隙寸法Gの絶対測定が可能となる。ひずみ ε は、無ひずみ状態での光強度が最小となるウェッジ端からの距離を $L_{\min}[G(0)]$ 、ひずみ ε がかかった状態での光強度が最小となるウェッジ端からの距離を $L_{\min}[G(\varepsilon)]$ とすると、数1であらわされる。

【0009】

【数1】

$$\varepsilon = \frac{\{L_{\min}[G(\varepsilon)] - L_{\min}[G(0)]\} \cdot \tan(\gamma)}{L_G}$$

なお、この方式は、光源として高コヒーレント光源を使用した場合には、光相関信号が拡がってしまい最小または最大位置検出が困難となる。

【0010】

図15に、光源の波長スペクトルがガウス分布を有するとして、中心波長を $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$ 、半値幅 $\Delta\lambda$ を5nm、25nmおよび60nmとした場合のセンサシステム出力のシミュレーションの例を示す。スペクトル半値幅が狭くなり、光源が高コヒーレントとなるにつれて光相関信号が拡がり、且つフィゾー干渉計108bのゼロパスレンジ干渉領域が拡がり光相関信号の最小位置検出が難しくなることが分かる。図15で、横軸の1.0の位置がギャップ間隙に対応する。このことに関しては、後に詳述する。

図13において、ギャップ（通常は空気）の屈折率を n 、部分反射膜F1およびF2の反射率を R （透過率 T は $T = 1 - R$ ）とする。ここで、部分反射膜による光の吸収は無視している。このとき、入射光に対するファブリペロー干渉計の透過係数 $T(\lambda, d)$ および反射係数 $R(\lambda, d)$ は次の数2および数3であらわされる。

【 0 0 1 1 】

【数 2】

$$T(\lambda, d) = \frac{1}{1 + F \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi nd}{\lambda} \right]}$$

【数 3】

$$\begin{aligned} R(\lambda, d) &= 1 - T(\lambda, d) \\ &= \frac{F \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi nd}{\lambda} \right]}{1 + F \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi nd}{\lambda} \right]} \end{aligned}$$

ここで、 d はギャップの間隙寸法 (対向する部分反射膜間の距離 = G)、 λ は光の波長である。 F はフィネスであり、数 4 であらわされる。

【 0 0 1 2 】

【数 4】

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2}$$

また、フィネス F および屈折率 n は、定数であるので、ファブリペロー干渉計における光の透過係数 $T(\lambda, d)$ および反射係数 $R(\lambda, d)$ は、光の波長 λ およびギャップ間隙 d により変化することがわかる。

【 0 0 1 3 】

図 17 (a)、(b) および図 18 (a)、(b) に、ギャップ間隙 $d (= G)$ を変えたとき [ギャップ間隙: $d_1 =$ (a) の場合 $20 \mu\text{m}$ と (b) の場合 $d_2 = 40 \mu\text{m}$; すなわち $d_1 < d_2$] の光の波長に対する透過係数 $T(\lambda, d)$ および反射係数 $R(\lambda, d)$ の変化の計算例をそれぞれ示している。

あるギャップ間隙 d に対して、透過係数 $T(\lambda, d)$ および反射係数 $R(\lambda, d)$ の波長スペクトルは一義的に決まるので、波長スペクトルからギャップ間隙 d を求めることもできる。

実際の低コヒーレンス光源の波長スペクトルは、波長に対してある広がりを持って分布している。図 19 (a)、(b) および図 20 (a)、(b) に、波長

に対してガウス分布を有する光源の波長スペクトル $S_0(\lambda)$ 、およびギャップ間隙 d を変えたときの、光の波長に対する透過スペクトル強度分布 $S_T(\lambda, d)$ および反射スペクトル強度分布 $S_R(\lambda, d)$ の計算例をそれぞれ示している。この場合も、ギャップ間隙は (a) の場合 $d_1 = 20 \mu\text{m}$ と (b) の場合 $d_2 = 40 \mu\text{m}$ 、すなわち $d_1 < d_2$ である。

ここで、ファブリペロー型光ファイバー干渉ひずみセンサのギャップ間隙を G とすると、センサ通過後の光信号の透過スペクトル強度分布 $S_T(\lambda, G)$ および反射スペクトル強度分布 $S_R(\lambda, G)$ は光源の波長スペクトルを $S_0(\lambda)$ として、数 2 および数 3 より、次の数 5、数 6、数 7 および数 8 であらわされる。

【 0 0 1 4 】

【数 5】

$$\begin{aligned} S_T(\lambda, G) &= S_0(\lambda) \cdot T_s(\lambda, G) \\ &= \frac{S_0(\lambda)}{1 + F_s \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi n_s G}{\lambda} \right]} \end{aligned}$$

【 0 0 1 5 】

【数 6】

$$\begin{aligned} S_R(\lambda, G) &= S_0(\lambda) \cdot R_s(\lambda, G) \\ &= S_0(\lambda) \cdot \frac{F_s \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi n_s G}{\lambda} \right]}{1 + F_s \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi n_s G}{\lambda} \right]} \end{aligned}$$

【 0 0 1 6 】

【数 7】

$$T_s(\lambda, G) = \frac{1}{1 + F_s \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi n_s G}{\lambda} \right]}$$

【 0 0 1 7 】

【数 8】

$$R_s(\lambda, G) = 1 - T_s(\lambda, G)$$

$$= \frac{F_s \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi n_s G}{\lambda} \right]}{1 + F_s \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi n_s G}{\lambda} \right]}$$

【0018】

【数 9】

$$F_s = \frac{4R_s}{(1-R_s)^2}$$

【0019】

ここで、 $T_s(\lambda, G)$ 、 $R_s(\lambda, G)$ 、 F_s 、 n_s および R_s は、それぞれファブリペロー型光ファイバー干渉ひずみセンサの透過係数の波長スペクトル分布、反射係数の波長スペクトル分布、フィネス、ギャップ間屈折率および部分反射膜の反射率をあらわしている。

センサ部100からの信号光は、光信号復調部108、すなわち対向する面が微小角度(γ)傾いているフィゾー干渉計(ウェッジ型ファブリペロー干渉計)108bのテーパ状をなすギャップの各位置において、フィゾー干渉計108bの波長スペクトル特性との光相関を生じさせる。

フィゾー干渉計108bの波長スペクトル $T_D(\lambda, d)$ は、数2と同様に次の数10および数11であらわされる。

【0020】

【数 10】

$$T_D(\lambda, d) = \frac{1}{1 + F_D \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi n_D d}{\lambda} \right]}$$

【0021】

【数 11】

$$F_D = \frac{4R_D}{(1-R_D)^2}$$

ここで、 F_D 、 R_D および n_D はそれぞれフィゾー干渉計108bのフィネス、部分反射膜の反射率およびギャップ間隙における屈折率をあらわしている。

また、フィゾー干渉計108bのウェッジ端から距離 L の位置でのギャップ間隙 d は、数12であらわされる。

【0022】

【数12】

$$d = L \cdot \tan(\gamma)$$

したがって、フィゾー干渉計を通過した後の光信号の波長スペクトル分布 $S_{T, total}(\lambda, G, d)$ （センサ部100を透過した光信号の場合）および $S_{R, total}(\lambda, G, d)$ （センサ部100において反射した光信号の場合）は、数13および数14であらわされる。

【0023】

【数13】

$$\begin{aligned} S_{T, total}(\lambda, G, d) &= S_0(\lambda) \cdot T_s(\lambda, G) \cdot T_D(\lambda, d) \\ &= S_T(\lambda, G) \cdot T_D(\lambda, d) \\ &= \frac{S_0(\lambda)}{\left[1 + F_s \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_s G}{\lambda}\right)\right] \cdot \left[1 + F_D \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_D d}{\lambda}\right)\right]} \end{aligned}$$

【0024】

【数14】

$$\begin{aligned} S_{R, total}(\lambda, G, d) &= S_0(\lambda) \cdot R_s(\lambda, G) \cdot T_D(\lambda, d) \\ &= S_R(\lambda, G) \cdot T_D(\lambda, d) \\ &= S_0(\lambda) \cdot \frac{F_s \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_s G}{\lambda}\right)}{\left[1 + F_s \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_s G}{\lambda}\right)\right] \cdot \left[1 + F_D \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_D d}{\lambda}\right)\right]} \end{aligned}$$

【0025】

計測システムとしての出力信号 $X_R(G, d)$ （センサから反射した光信号の場合）および $X_T(G, d)$ （センサを透過した光信号の場合）は、センサとしてのファブリペロー干渉計とフィゾー干渉計の2つの干渉計を通過した光相関による光強度信号である。これら出力信号 $X_R(G, d)$ および $X_T(G, d)$ は、

それぞれ数 1 3 および数 1 4 を波長に関して積分した形で表現され、数 1 5 および数 1 6 であらわされる。

【 0 0 2 6 】

【数 1 5】

$$\begin{aligned} X_T(G, d) &= \int S_T(\lambda, G, d) \cdot d\lambda \\ &= \int \frac{S_0(\lambda)}{\left[1 + F_s \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_s G}{\lambda}\right)\right] \cdot \left[1 + F_D \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_D d}{\lambda}\right)\right]} \cdot d\lambda \end{aligned}$$

【 0 0 2 7 】

【数 1 6】

$$\begin{aligned} X_R(G, d) &= \int S_R(\lambda, G, d) \cdot d\lambda \\ &= \int S_0(\lambda) \cdot \frac{F_s \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_s G}{\lambda}\right)}{\left[1 + F_s \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_s G}{\lambda}\right)\right] \cdot \left[1 + F_D \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi n_D d}{\lambda}\right)\right]} \cdot d\lambda \end{aligned}$$

上述した計測システムの透過型システムの模式的なブロック図を図 2 1 に、反射型システムの模式的なブロック図を図 2 2 にそれぞれ示している。

【 0 0 2 8 】

図 2 3 に、上述したシステムにおける信号出力をシミュレートした出力例を示している。図 2 3 (a) の破線で囲んだ部分がセンサ部 1 0 0 のギャップ間隙情報を含んだ光相関信号である。図 2 3 (b) は、その光相関信号部を拡大したものである。横軸 1. 0 の位置がギャップ間隙位置に対応している。また、図 2 3 (a) の一点鎖線で囲んだフィゾー干渉計 1 0 8 b のウェッジ端に近接したゼロ位置近傍の信号は、フィゾー干渉計 1 0 8 b のみに起因する信号であり、低コヒーレンス光源を使用しているためフィゾー干渉計 1 0 8 b のギャップ間隙がゼロの位置近傍に局在している。これはセンサ部 1 0 0 とフィゾー干渉計 1 0 8 b との光相関による信号ではない。この信号部分をゼロパスレンジ干渉領域と称する。

先に述べた図 1 5 は、光源の波長スペクトル幅、すなわち半値幅 ($\Delta \lambda$) を変えた場合のセンサ計測システムの出力信号をシミュレートした例を示している。

ここでは、光源の波長スペクトルがガウス分布を有しているとして、中心波長 λ_0 を850nm、半値幅 $\Delta\lambda$ を5nm、25nmおよび60nmとした。光源が高コヒーレンスとなりスペクトル半値幅 $\Delta\lambda$ が狭くなるにつれて光相関信号が広がり、且つフィゾー干渉計のゼロパスレンジ干渉領域が広がって、光相関信号の最小位置の検出が困難になることがわかる。

【0029】

図24(a)、(b)に、光相関信号とゼロパスレンジ干渉との違いについての比較確認試験の計測ブロック図を示す。図24において、図24(b)のギャップ固定ファブリペロー干渉計は、光ファイバ2本の端面に部分反射膜を成膜した後に、マイクロキャピラリチューブに挿入し、端面をギャップを存して対峙させて固定したファブリペロー干渉計であり、前述した図12のファブリペロー型光ファイバ干渉ひずみセンサに類似した構造となっており、ここではセンサとしての役割を担っている。また、図24(a)および(b)のギャップ可変ファブリペロー干渉計は、光ファイバ2本の端面に部分反射膜（例えば、 TiO_2 薄膜）を成膜した後、それぞれをピエゾステージに対峙させて連結固定し、そのギャップ間隙を可変としたもので、図12における光信号復調部108のフィゾー干渉計108bの役割を担っている。すなわち、フィゾー干渉計108bは、センサ部100からの信号光をウェッジを持った干渉計で空間的に広げて一度に測定するのに対して、ギャップ可変ファブリペロー干渉計は、そのギャップ間隙寸法を逐次変えつつ各ギャップ間隙寸法毎に測定をする。この場合、光源としては、LED（発光ダイオード）（L7560 [HAMAMATSU]）を使用し、光ファイバとしては、マルチモードファイバ（GI50/125, NA=0.12）を使用し、ピエゾステージとしては、3軸ナノポジショニングステージ（17ANC001/MD [MELLES GRIOT]）を使用した。

【0030】

図25には、図24(a)および(b)の2つの計測システムにおいて、ギャップ可変ファブリペロー干渉計のギャップ間隙寸法を前記ピエゾステージにより微小変化させつつ測定した場合の光パワーメータ出力の変動を示している。前述したように、ギャップ可変ファブリペロー干渉計のギャップ間隙寸法がゼロ付近

のゼロパスレングス干渉領域は何れの計測システムでも存在するのに対して、光相関信号はセンサとしてのギャップ固定ファブリペロー干渉計がある場合にのみ存在し、且つその信号の最小位置はギャップ固定ファブリペロー干渉計のギャップ間隙寸法と対応している。これらと同様な結果はシミュレーションによっても示すことができる。

【 0 0 3 1 】

【発明が解決しようとする課題】

実際のセンサ計測システムにおいて、図 3 0 (a)、(b) のような出力信号を得て、高精度な計測システムを実現するためには、リニアイメージセンサの時系列の信号出力波形として、低周波の揺らぎおよび変動が少なく、S/N (信号対雑音比) が高い明瞭な波形を得る必要がある。

そのためには、センサシステムを構成するコリメートレンズ、フォーカスレンズ、フィゾー干渉計およびリニアイメージセンサ等を含む光学系の高精度なアライメントの調整 (微調整) が必要となる。しかも、リニアイメージセンサは検出ノイズが大きく、検出システムが複雑となる傾向がある。

そこで、光ファイバ干渉センサにおけるセンサの校正のために、光相関信号が測定範囲 (センサの定格範囲) から分離されているバックグラウンドとしての信号を取得し、そのデータをもとに一連の信号処理を行って、低周波の揺らぎおよびノイズ等の不要な信号を除去し高精度なセンサ計測システムを実現することが考えられる。この光ファイバ干渉センサでは、校正時に、測定範囲より広い範囲の負荷特性データを取得し、データとしては測定範囲のデータをバックグラウンドデータとして利用する。この手法では、簡便な光学系の調整で高精度な計測システムを実現することができ、コストの低廉化を図ることが可能となるという利点がある。

【 0 0 3 2 】

ところで、この方式では、光源の波長スペクトル帯域が同一であれば、センサシステムの出力信号波形はほとんど変化しない。すなわち、図 2 6 ~ 図 2 8 に、光源波長スペクトル帯域がほぼ同一である 4 つの異なる波長スペクトル分布 (図 2 6) を有する光源からのセンサシステム出力信号波形 (図 2 7 および図 2 8) の

シミュレーションの例を示す。また、このことは、図 2 9 および図 3 0 に示すように実際の実験においても確認されている。

すなわち、図 2 6 (a)、(b)、(c)、(d) には、ほぼ同一の光源波長スペクトル帯域を有する 4 つの異なる波長スペクトル分布をもつ光源 1、光源 2、光源 3 および光源 4 についての波長スペクトル、センサからの反射信号スペクトルおよびギャップ可変ファブリペロー干渉計を通過した後の波長スペクトルのシミュレーション結果を示している。波長スペクトルを見ると、これら 4 つの光源（光源 1～光源 4）についての波形は大きく異なっている。そして、図 2 7 (a)、(b)、(c)、(d) および図 2 8 (a)、(b)、(c)、(d) には、ギャップ可変ファブリペロー干渉計を通過した光源 1～光源 4 の信号光のギャップ間隔に対する光強度出力のシミュレーション結果を示している。ここで、センサのギャップ間隔は $20\mu\text{m}$ とした。図 2 8 から分かるように、光源 1～光源 4 の波長スペクトル形状が大きく異なっているにもかかわらず、光源 1～光源 4 についての光相関信号波形は、著しく類似している。

【 0 0 3 3 】

図 2 9 (a) および (b) に、2 つの LED 光源 (L7560 [HAMAMATSU] および RL E8P4-002 [DAIDO STEEL CO., LTD.]) の波長スペクトル分布を、図 3 0 (a) および (b) にそれらの光相関信号の実験による測定結果を示している。一方の RL E8P4-002 の波長スペクトルが、他方の L7560 と比較して長波長側にシフトしており、スペクトルの広がりやや狭いため、対応する光相関信号波形が広がっているが、スペクトル波形が異なるにもかかわらず、非常に似通った光相関出力波形となっている。

このように、スペクトル波形が異なっても非常に似通った光相関出力波形が得られるということは、高精度なセンサを実現する上では、非常に重要なファクタとなる。すなわち、温度等の外乱により光源の波長スペクトルがある程度変動しても光相関信号波形形状は変化せず、センサのギャップ間隔位置が安定して測定できる。しかも、光源の波長スペクトル分布を広くとることにより、光相関信号が広がらず、不要なノイズ成分の影響が少なくなる。したがって、光源の高精度化を図る必要がなく、安価で高精度なセンサシステムを実現することが可能

となる。

【 0 0 3 4 】

本発明は、上述した事情に鑑みてなされたもので、簡単な構成で、低周波のゆらぎおよびノイズ等の不要な信号成分による影響を効果的に抑制し、光学系の簡易な調整および検出信号の簡単な信号処理によって、高精度な測定結果を得ることを可能とする光ファイバ干渉センサ、光ファイバ干渉センサの信号処理システム、方法および記録媒体を提供することを目的としている。

本発明の請求項 1 の目的は、特に、信号処理系を含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることを可能とする光ファイバ干渉センサを提供することにある。

また、本発明の請求項 2 の目的は、特に、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことができる光ファイバ干渉センサを提供することにある。

本発明の請求項 3 の目的は、特に、高精度の測定を、簡単な構成で実現し得る光ファイバ干渉センサを提供することにある。

本発明の請求項 4 の目的は、特に、不要成分を一層効果的に除去または抑制し得る光ファイバ干渉センサを提供することにある。

【 0 0 3 5 】

本発明の請求項 5 の目的は、特に、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現し得る光ファイバ干渉センサを提供することにある。

本発明の請求項 6 の目的は、特に、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現し得る光ファイバ干渉センサを提供することにある。

本発明の請求項 7 の目的は、特に、不要成分をさらに効果的に除去または抑制し、高精度の測定を実現し得る光ファイバ干渉センサを提供することにある。

本発明の請求項 8 の目的は、特に、高精度の測定を、簡易な構成で実現し得る光ファイバ干渉センサを提供することにある。

本発明の請求項 9 の目的は、特に、信号処理系を含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることを可能とする光ファイバ干渉センサの信号処理システムを提供することにある。

本発明の請求項 1 0 の目的は、特に、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことができる光ファイバ干渉センサの信号処理システムを提供することにある。

【 0 0 3 6 】

本発明の請求項 1 1 の目的は、特に、信号処理系を含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることを可能とする光ファイバ干渉センサの信号処理方法を提供することにある。

本発明の請求項 1 2 の目的は、特に、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことができる光ファイバ干渉センサの信号処理方法を提供することにある。

本発明の請求項 1 3 の目的は、特に、コンピュータによる光ファイバ干渉センサの信号処理について、信号処理系も含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることを可能とするプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体を提供することにある。

本発明の請求項 1 4 の目的は、特に、コンピュータによる光ファイバ干渉センサの信号処理について、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことを可能とするプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体を提供することにある。

【 0 0 3 7 】

【課題を解決するための手段】

請求項 1 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサは、上述した目的を達成するために、

力、ひずみ、圧力および温度等の物理量により変動する被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を検出して、前記被計測間隙を求め、前記物理量の

大きさを計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサにおいて、

前記低コヒーレンス光源として、波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段と、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段と

を具備することを特徴としている。

【 0 0 3 8 】

また、請求項 2 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサは、上述した目的を達成するために、

力、ひずみ、圧力および温度等の物理量により変動する被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または最大位置を検出して、前記被計測間隙を求め、前記物理量の大きさを計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサにおいて、

前記低コヒーレンス光源として、波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段と、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理手段と、

前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段と

を具備することを特徴としている。

【 0 0 3 9 】

請求項 3 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサは、前記広帯域光源が、ハロゲンランプおよび白色発光ダイオードのうちのいずれかであることを特徴としている。

請求項 4 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサは、前記光相関信号抽出手段が、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するバックグラウンド信号除去手段を含むことを特徴としている。

請求項 5 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサは、前記バックグラウンド信号除去手段が、最小二乗多項式フィッティングによりバックグラウンド信号を推定して、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含むことを特徴としている。

請求項 6 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサは、前記バックグラウンド信号除去手段が、所要の計測範囲に光相関信号を含まない状態での実測生データをバックグラウンド信号として、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含むことを特徴としている。

【 0 0 4 0 】

請求項 7 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサは、

前記極値位置算出手段が、

前記光相関信号を多項式適合平滑化法に基づいて平滑化微分処理する平滑化微分処理手段と、

前記平滑化微分処理手段の出力がレベル零と交わる零クロス点を求める零クロス点算出手段と

を含むことを特徴としている。

請求項 8 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサは、前記高周波成分除去処理手段が、ローパスフィルタを含むことを特徴としている。

【 0 0 4 1 】

請求項 9 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサの信号処理システムは

、上述した目的を達成するために、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、

前記低コヒーレンス光源として波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段と、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段とを具備することを特徴としている。

【 0 0 4 2 】

請求項 1 0 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサの信号処理システムは、上述した目的を達成するために、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、

前記低コヒーレンス光源として波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段と、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理手段と、

前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段と

を具備することを特徴としている。

【 0 0 4 3 】

前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムは、前記光相関信号抽出手段が、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するバックグラウンド信号除去手段を含むことを特徴としている。

さらに、前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムは、前記バックグラウンド信号除去手段が、最小二乗多項式フィッティングによりバックグラウンド信号を推定して、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含むことを特徴としている。

さらに、前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムは、前記バックグラウンド信号除去手段が、所要の計測範囲に光相関信号を含まない状態での実測生データをバックグラウンド信号として、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含むことを特徴としている。

【 0 0 4 4 】

さらに、前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムは、
前記極値位置算出手段が、

前記光相関信号を多項式適合平滑化法に基づいて平滑化微分処理する平滑化微分処理手段と、

前記平滑化微分処理手段の出力がレベル零と交わる零クロス点を求める零クロス点算出手段と
を含むことを特徴としている。

さらに、前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムは、前記高周波成分除去処理手段が、ローパスフィルタを含むことを特徴としている。

【 0 0 4 5 】

請求項 1 1 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサの信号処理方法は、上述した目的を達成するために、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出ステップと、

前記光相関信号抽出ステップで抽出された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出ステップとを有することを特徴としている。

【 0 0 4 6 】

請求項 1 2 に記載した本発明に係る光ファイバ干渉センサの信号処理方法は、上述した目的を達成するために、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出ステップと、

前記光相関信号抽出ステップにより抽出される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理ステップと、

前記高周波成分除去処理ステップにより高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出ステップと

を有することを特徴としている。

【 0 0 4 7 】

この光ファイバ干渉センサの信号処理方法は、前記光相関信号抽出ステップが、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するバックグラウンド信号除去ステップを含むことを特徴としている。

さらに、前記光ファイバ干渉センサの信号処理方法は、前記バックグラウンド信号除去ステップが、最小二乗多項式フィッティングによりバックグラウンド信号を推定して、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するステップを含むことを特徴としている。

さらに、前記光ファイバ干渉センサの信号処理方法は、前記バックグラウンド信号除去ステップが、所要の計測範囲に光相関信号を含まない状態での実測生データをバックグラウンド信号として、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するステップを含むことを特徴としている。

【 0 0 4 8 】

さらに、前記光ファイバ干渉センサの信号処理方法は、

前記極値位置算出ステップが、

前記光相関信号を多項式適合平滑化法に基づいて平滑化微分処理する平滑化微分処理ステップと、

前記平滑化微分処理ステップにより平滑化された信号がレベル零と交わる零クロス点を求める零クロス点算出ステップと

を含むことを特徴としている。

【 0 0 4 9 】

請求項 1 3 に記載した本発明に係る、コンピュータ読み取り可能な記録媒体は

、
被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理にあたり、コンピュータを、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段、および

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段
として機能させるためのプログラムを記録したことを特徴としている。

【 0 0 5 0 】

請求項 1 4 に記載した本発明に係る、コンピュータ読み取り可能な記録媒体は

、
被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理にあたり、コンピュータを、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関

信号抽出手段、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理手段、および

前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段

として機能させるためのプログラムを記録したことを特徴としている。

【 0 0 5 1 】

【作用】

すなわち、本発明の請求項 1 による光ファイバ干渉センサは、力、ひずみ、圧力および温度等の物理量により変動する被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を検出して、前記被計測間隙を求め、前記物理量の大きさを計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサにおいて、前記低コヒーレンス光源として、波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ光相関信号抽出手段により前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出し、極値位置算出手段により前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める。

このような構成により、簡単な構成で、低周波のゆらぎおよびノイズ等の不要な信号成分による影響を効果的に抑制し、光学系の簡易な調整および検出信号の簡単な信号処理によって、高精度な測定結果を得ることを可能とし、特に、信号処理系を含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることが可能となる。

【 0 0 5 2 】

また、本発明の請求項 2 による光ファイバ干渉センサは、ファブリペロー型の光ファイバ干渉センサにおいて、前記低コヒーレンス光源として、波長スペクト

ル分布が広い広帯域光源を用い、且つ光相関信号抽出手段により、前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出し、高周波成分除去処理手段により、前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去して、極値位置算出手段により、前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める。

このような構成により、特に、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことができる。

【 0 0 5 3 】

本発明の請求項 3 による光ファイバ干渉センサは、前記広帯域光源が、ハロゲンランプおよび白色発光ダイオードのうちのいずれかである。

このような構成により、特に、高精度の測定を、簡単な構成で実現することができる。

本発明の請求項 4 による光ファイバ干渉センサは、前記光相関信号抽出手段が、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するバックグラウンド信号除去手段を含む。

このような構成により、特に、不要成分を一層効果的に除去または抑制することができる。

本発明の請求項 5 による光ファイバ干渉センサは、前記バックグラウンド信号除去手段が、最小二乗多項式フィッティングによりバックグラウンド信号を推定して、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含む。

このような構成により、特に、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現することができる。

【 0 0 5 4 】

本発明の請求項 6 による光ファイバ干渉センサは、前記バックグラウンド信号除去手段が、所要の計測範囲に光相関信号を含まない状態での実測生データをバックグラウンド信号として、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含む。

このような構成により、特に、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現することができる。

本発明の請求項 7 による光ファイバ干渉センサは、

前記極値位置算出手段が、

前記光相関信号を多項式適合平滑化法に基づいて平滑化微分処理する平滑化微分処理手段と、

前記平滑化微分処理手段の出力がレベル零と交わる零クロス点を求める零クロス点算出手段と

を含む。

このような構成により、特に、不要成分をさらに効果的に除去または抑制し、高精度の測定を実現することができる。

【 0 0 5 5 】

本発明の請求項 8 による光ファイバ干渉センサは、前記高周波成分除去処理手段が、ローパスフィルタを含む。

このような構成により、特に、高精度の測定を、簡易な構成で実現することができる。

さらに、本発明の請求項 9 による光ファイバ干渉センサの信号処理システムは、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、光相関信号抽出手段によって、前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出し、極値位置算出手段によって前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める。

このような構成により、特に、信号処理系を含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることが可能となる。

【 0 0 5 6 】

また、本発明の請求項 1 0 による光ファイバ干渉センサの信号処理システムは、被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、光相関信号抽出手段によって、前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出し、高周波成分除去処理手段によって、前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去して、極値位置算出手段によって、前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める。

このような構成により、特に、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことができる。

【 0 0 5 7 】

さらにまた、本発明の請求項 1 1 による光ファイバ干渉センサの信号処理方法は、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干

渉センサの信号処理方法において、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出ステップと、

前記光相関信号抽出ステップで抽出された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出ステップとを有する。

このような構成により、特に、信号処理系を含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることが可能となる。

【 0 0 5 8 】

また、本発明の請求項 1 2 による光ファイバ干渉センサの信号処理方法は、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出ステップと、

前記光相関信号抽出ステップにより抽出される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理ステップと、

前記高周波成分除去処理ステップにより高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出ステップとを有する。

このような構成により、特に、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことができる。

【 0 0 5 9 】

その上また、本発明の請求項 1 3 によるコンピュータ読み取り可能な記録媒体は、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理にあたり、コンピュータを、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段、および

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段として機能させるためのプログラムを記録している。

このようなプログラムを実行することにより、特に、コンピュータによる光ファイバ干渉センサの信号処理について、信号処理系も含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることが可能となる。

【 0 0 6 0 】

また、本発明の請求項 1 4 によるコンピュータ読み取り可能な記録媒体は、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理にあたり、コンピュータを、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関

信号抽出手段、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理手段、および

前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段

として機能させるためのプログラムを記録している。

このようなプログラムを実行することにより、特に、コンピュータによる光ファイバ干渉センサの信号処理について、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことが可能となる。

【 0 0 6 1 】

【発明の実施の形態】

以下、実施の形態に基づき、図面を参照して本発明の光ファイバ干渉センサを詳細に説明する。

本発明の実施の形態に係る光ファイバ干渉センサは、例えば、ハロゲンランプおよび白色LED等のように、波長スペクトル分布が広い光源を使用することにより、センサシステム出力信号中のギャップ間隔情報を含んだ光相関信号を、充分に局所化して、波形信号処理を簡素化し、センサとして的高速応答を実現する。この光ファイバ干渉センサでは、広帯域の波長スペクトルを有する光源および簡単な信号処理を用いることにより、簡単な構成で高精度な計測システムを実現することができ、コストの低廉化を図ることが可能となるという利点がある。

図1および図2は、本発明の第1の実施の形態に係る光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルとして構成した光ファイバ干渉センサの構成を示している。図1は、全体の構成を模式的に示しており、その信号処理部の具体的な構成を図2に示している。

【 0 0 6 2 】

図1に示す本発明に係る光ファイバ干渉センサである光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルは、光源1、第1の光ファイバ2、 $[2 \times 2]$ カプラ3、第2の光ファイバ4、第3の光ファイバ5、ファブリペロー型ロードセル

6、第4の光ファイバ7、ギャップ可変ファブリペロー干渉計8、光検出器9、光パワーメータ10、A/D（アナログーデジタル）変換器11および信号処理部12を具備している。

図2は、図1における信号処理部12の構成を具体的に示すものであり、光検出器9から信号処理部12までの信号処理に係る部分の構成を示している。信号処理部12は、DSP（デジタルシグナルプロセッサ）121、データメモリ122、校正データメモリ123、プログラムメモリ124、表示器125およびD/A（デジタルーアナログ）変換器126を具備している。

図1において、光源1は、レーザ等の高コヒーレンス光ではなく、しかも白色光等の広帯域の低コヒーレンス光を発生する。この光源1としては、例えばタングステンハロゲンランプおよび白色LED等を用いることができる。第1の光ファイバ2は、光源1からの低コヒーレンス光を〔2×2〕カプラ3へ導く光ファイバである。

【0063】

〔2×2〕カプラ3は、第1～第4ポートを有しており、第1ポートから入力した光を、50%/50%の強度比で、第2ポートおよび第3ポートに分岐出力する。また、〔2×2〕カプラ3は、第3ポートから入力した光を、第4ポートに出力する。〔2×2〕カプラ3の第1ポートには、上述したように第1の光ファイバ2が接続されているが、第2ポート、第3ポートおよび第4ポートには、それぞれ第2の光ファイバ4、第3の光ファイバ5および第4の光ファイバ6が接続されている。〔2×2〕カプラ3の第2ポートの出力光は、第1ポートの入力光に比例しているので、この第2ポートの出力は第2の光ファイバ4を介して、例えば光源1の制御部（図示していない）にフィードバックされ、光源1の発光制御に利用される。〔2×2〕カプラ3の第3ポートの出力光は、第3の光ファイバ5を介してファブリペロー型ロードセル6に導かれる。ファブリペロー型ロードセル6における被計測間隙に応じた出力光は、第3の光ファイバ5を介して〔2×2〕カプラ3へ導かれる。〔2×2〕カプラ3は、第3の光ファイバ5を介して第3ポートに導かれたファブリペロー型ロードセル6の出力光を、第4ポートに接続された第4の光ファイバ7により信号復調部のギャップ可変ファブ

リペロー型干渉計 8 へ導く。

【 0 0 6 4 】

ファブリペロー型ロードセル 6 は、ファブリペロー型の光干渉センサであるファブリペロー干渉計が組み込まれたロードセルであり、台座 6 a、ダイアフラム 6 b および荷重導入部 6 c を有する。ファブリペロー型ロードセル 6 の台座には、[2×2] カプラ 3 の第 3 ポートに一端が接続された第 3 の光ファイバ 5 の他端が接着等により固着されており、その第 3 の光ファイバ 5 の先端面には部分反射膜が成膜されている。ファブリペロー型ロードセル 6 は、第 3 の光ファイバ 5 の部分反射膜が成膜された端面に対峙して部分反射膜が成膜されており、荷重等の負荷により変形するダイアフラム 6 b が所定のギャップ、つまり被計測間隙、を存して配置されている。ダイアフラム 6 b の光ファイバ端面に対峙する部分に成膜された部分反射膜は、例えば、入射光の一部を反射し、残部は吸収する薄膜である。上述した所定のギャップ間隙を形成して対峙するギャップ部により、前述したようなファブリペロー干渉計が構成されている。

【 0 0 6 5 】

このファブリペロー型ロードセル 6 に荷重をかけると、ダイアフラム 6 b が変形しギャップの間隙寸法が変化する。そのギャップの間隙寸法の変化を検出することにより荷重を求めることができる。すなわち、ファブリペロー干渉計であるファブリペロー型ロードセル 6 に第 3 の光ファイバ 5 により導かれた光は、相対峙する部分反射面により形成されるギャップ部で多重反射し、ギャップの間隙寸法に応じて波長変調される。波長変調された光波、つまり光信号は、ファブリペロー型ロードセル 6 のセンサ部で反射して第 3 の光ファイバ 5 に戻り、第 3 ポートから [2×2] カプラ 3 に入力される。

第 4 の光ファイバ 7 は、ファブリペロー型ロードセル 6 から [2×2] カプラ 3 に入力された波長変調された光信号を、[2×2] カプラ 3 の第 4 ポートから光信号復調部のギャップ可変ファブリペロー型干渉計 8 に導く。

【 0 0 6 6 】

ギャップ可変ファブリペロー型干渉計 8 は、ギャップ間隙可変干渉計 8 a を有し、このギャップ間隙可変干渉計 8 a のギャップ間隙を、例えばピエゾアクチュ

エータ（図示していない）により変化させ得るようにしている。このギャップ間隙を変えることにより、ファブリペロー型ロードセル 6 のセンサギャップ間隙近傍で光相関信号を得ることができる。

【 0 0 6 7 】

すなわち、ギャップ可変ファブリペロー型干渉計 8 では、入射光が、ピエゾアクチュエータにより変化されるギャップの各位置において多重反射して波長スペクトル特性との光相関を生じ、ファブリペロー型ロードセル 6 におけるギャップの間隙寸法と一致する間隙となる位置で光強度が最小となり、光検出器 9 により光相関信号として検出される。この光相関信号が光検出器 9 から光パワーメータ 10 に与えられ計測される。なお、この場合、ギャップ可変ファブリペロー型干渉計 8 は、ギャップ間隙可変干渉計 8 a を作動させるピエゾアクチュエータ、並びに光パワーメータ 10 および A/D 変換部 11 に、同期して動作タイミングを規定する信号を与えるためのタイミングジェネレータ 8 b を備えている（図 2 参照）。

光パワーメータ 10 は、光検出器 9 の出力を計測する。A/D 変換器 11 は、ギャップ可変ファブリペロー型干渉計 8 のタイミングジェネレータ 8 b から供給されるタイミング信号に応動して、光検出器 9 で読み取り光パワーメータ 10 で処理した光相関信号をデジタル情報に変換する。

【 0 0 6 8 】

信号処理部 12 は、A/D 変換器 11 により A/D 変換された信号を処理して、計測結果を得る。信号処理部 12 は、光検出器 9 から光パワーメータ 10 を介して得られる時系列の信号から所要の光相関信号を抽出し、その光相関信号の高周波のノイズ成分をローパスフィルタ処理により除去し、高周波の不要成分が除去された信号を微分して、該微分値がレベル零と交わる零クロス点を求める。

次に、図 2 に示した信号処理部 12 を構成する各部について説明する。

DSP（デジタルシグナルプロセッサ）121 は、プログラムメモリ 124 に書き込まれたプログラムの流れに従って一連の信号処理（図 3 のフローチャート参照）を実行する。DSP 121 は、信号処理の実行の過程で、データメモリ 122 および校正データメモリ 123 を必要に応じてアクセスする。なお、この

DSP121に代えて汎用のMPU（マイクロプロセッサ）を用いて同等の機能を達成するようにしてもよい。

【0069】

データメモリ122は、例えばRAM（random access memory：ランダムアクセスメモリ）により構成され、A/D変換器11から与えられるデジタル化されたイメージ情報データおよびDSP121の信号処理動作に係る中間データ等の各種データをDSP121のアクセス動作によって格納する。校正データメモリ123は、例えばEPROM（erasable programmable read only memory：消去可能PROM）を用いて構成され、ファブリペロー干渉計を構成するファブリペロー型ロードセル6の計測のバックグラウンドとしての校正データを格納する。プログラムメモリ124は、図3に示すような一連のデジタル処理をDSP121が実行するためのプログラムを予め格納する。

表示器125は、DSP121の処理結果および処理によって派生する情報を、DSP121の処理に関連し、必要に応じてユーザに情報として提示するために表示する。D/A（デジタルーアナログ）変換器126は、DSP121の処理結果および処理によって派生する情報を、デジタル値からアナログ値に変換して出力する。

【0070】

すなわち、信号処理部12における一連のデジタル信号処理は、プログラムメモリ124に書き込まれた処理の流れに従って、データメモリ122および校正データメモリ122を適宜必要に応じてアクセスしつつDSP121により実行される。

なお、以下の説明において、実測データの計測に用いた測定システムの構成について説明する。

ファブリペロー型光ファイバ干渉センサとしては、図1に示した光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセル6を用いた。ここで、光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセル6のギャップ間隔は $23\mu\text{m}$ 程度である。また、光パワーメータ10は、AQ2140（AQ2730 SENSOR UNIT）[ANDO]を使用した。

【 0 0 7 1 】

次に、センサシステム概要を説明する。光源 1 として用いた低コヒーレンス光源は、タングステンハロゲンランプを使用し、比較のために LED 光源 (L 7 5 6 0 [HAMAMATSU]) および SLD (半導体レーザ) 光源 (A S 3 B 3 8 1 F X [ANRITSU]) を使用した場合についての計測をも行なった。図 4 に、この実測に使用した低コヒーレンス光源の光ファイバ (G I 5 0 / 1 2 5, $NA = 0.12$) 導波後の波長スペクトルを示している。また、参考のために、LED 光源 (L 7 5 6 0 [HAMAMATSU]) および SLD 光源 (AS3B381FX [ANRITSU]) の波長スペクトルも示している。さらには、白色 LED 光源 (NSPW300BS [NICHIA]) の波長スペクトルも示している。この、白色 LED 光源を使用した白色干渉測定を試みたが、光ファイバ導波光の光強度が非常に弱く、波長スペクトルによる干渉は確認したが、光相関信号は検出することができなかった。最適なコリメートレンズおよび集光レンズ等を使用して光ファイバへの導波光強度をより強くするか、あるいは高感度な光検出器を使用するかすれば、この白色 LED 光源を用いた光相関信号検出は可能と考えられる。

【 0 0 7 2 】

また、光パワーメータ 1 0 からの出力信号を A/D 変換する A/D 変換器 1 1 としては、量子化ビット数が 12 ビット、サンプリング周波数 200 kHz の A-D 変換器 (ADC-150A [KYOWA], 12Bit, 200kHz) を使用した。A/D 変換器 1 3 の出力は G B I B 汎用インタフェースを介して、信号処理部 1 2 としての PC (パーソナルコンピュータ) に取り込んだ。

実測データの計測に際しては、DSP 1 2 1 に代えて、PC を用いて同等の信号処理を行なった。すなわち、PC に取り込んだ信号は、アプリケーション開発ソフト (L a b V I E W [NATIONAL INSTRUMENTS]) を用いて本発明方法に従った後述するような信号処理プログラムを作成して、実行させた。

既に述べたように、ファブリペロー型ロードセル 6 に荷重をかけると、ダイアフラム 6 b が変形してギャップの間隙寸法が変化し、そのギャップ間隙の変化を検出することにより荷重を求める。この場合、実測に用いたファブリペロー型ロードセル 6 は 9.807 N (1kgf) に対して約 $3 \mu m$ 変位する。

【 0 0 7 3 】

図 5 (a)、(b) および (c) に、測定した 3 つの異なる光源、すなわち (a) は、タングステンハロゲンランプ、(b) は、LED および (c) は、SLD による、ゼロパスレングスの干渉も含めた全スキャン範囲の光強度信号を示している。また、図 6 (a)、(b) および (c) に光相関信号部分 (図 5 の移動距離 $22\mu\text{m}$ 近傍) をそれぞれ拡大したものを示している。バックグラウンド光強度は、センサにかかる負荷によるギャップ間隔変化およびギャップ可変ファブリペロー干渉計のギャップ間隔 (移動距離) により変化しているが、後述する方法により補正して高精度なセンサを実現できる。

図 4 に示すタングステンハロゲンランプおよび白色 LED 光源のような広帯域波長スペクトルを有する光源をこのセンサシステムに使った場合、図 6 (a) および (b) から分かるように非常に局所的な光相関信号が得られる。それに対して、SLD 光源では図 6 (c) から分かるように、コヒーレンス長が長い場合光相関信号が広がっており、このセンサギャップ間隔ではゼロパスレングスの干渉信号と光相関信号が重なっており信号の分離ができない。

一方、LED 光源は、光相関信号は局所化しているが、コヒーレンス長さがタングステンハロゲンランプ光源と比較して長く、光相関信号に含まれている振動分を多く含んでおり、最小値を求めるためには複雑な信号処理が必要となる。これに対して、タングステンハロゲンランプ光源の場合は、複雑な波形処理を必要とせず光相関信号波形の最小位置が容易に検出でき、センサギャップ間隔を高精度でかつ短時間に求めることができる。

【 0 0 7 4 】

次に、図 1 および図 2 に示した光ファイバ干渉センサである光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルの主として信号処理部 12 における本発明方法に係るセンサの信号処理について、図 3 を参照して説明する。図 3 は信号処理のフローチャートであり、換言すれば、その処理のアルゴリズムを模式的に示す模式図でもある。ここで、図 4 に示したタングステンハロゲンランプ光源および白色 LED 光源のような広帯域波長スペクトルを有する光源 1 を使用することは、本発明において本質的に重要なファクタとなる。

以下、光パワーメータ 10 の光相関信号出力生データから光相関信号最小位置を検出する信号処理方法について図 3 を参照して具体的に説明する。以下において、出力信号データとは、A/D 変換器 13 で A/D 変換した後の出力信号データを示し、ステップ番号「S1」および「S2」等は、それぞれ図 3 に同符号を付して示す処理ステップを示している。

【0075】

〈ステップ S1： 光相関信号抽出〉

図 5 (a)、(b)、(c) および図 6 (a)、(b)、(c) からわかるように、信号波形には、センサにかかる負荷によるギャップ間隔変化およびギャップ可変ファブリペロー干渉計 8a のギャップ間隔（移動距離）により変化するバックグラウンド信号が含まれている。このバックグラウンド信号を除去しバイアス分のない光相関信号波形のみを抽出することにより、高精度なセンサのギャップ間隔測定が可能となる。

図 7 (a)、(b)、(c) および図 8 (a)、(b)、(c) に、時系列の出力信号データ $[S_{SIG}(n)]$ から光相関信号 $[S_{LCOR}(n)]$ を抽出する過程を示す。ここで n は時系列信号データのデータ番号をあらわす。

光相関信号の抽出には、まず、バックグラウンド信号 $S_{BACK}(n)$ に係数 K を乗算して、バックグラウンド信号のレベルに負荷を加えた信号出力生データの低周波揺らぎレベルに合わせる（信号 $K \cdot S_{BACK}(n)$ ）。その後、負荷を印加した出力信号生データを示す信号から、レベル調整データを減算し、光相関信号 $S_{LCOR}(n)$ を抽出する。

この過程を数式であらわすと数 17 のようになる。

【0076】

【数 17】

$$S_{LCOR}(n) = S_{SIG}(n) - K \cdot S_{BACK}(n)$$

この実施の形態では、光信号復調部にギャップ可変ファブリペロー干渉計を使用したため、ウェッジ型ファブリペロー干渉計（フィゾー干渉計）のような空間的に光を直線状に集光する必要がなく、バックグラウンド信号ノイズが比較的少ない。そこでこの実施の形態ではバックグラウンド信号除去に最小二乗多項式フィ

ッティングを用いた。なお、このバックグラウンド信号除去処理には、最小二乗フィッティングに代えてハイパスフィルタ (HPF (high pass filter) : 高域通過フィルタ) 処理を用いるようにしてもよい。

最小二乗フィッティングは、関数形を指定して測定データを曲線に当てはめるための手法一つとして知られており、広く利用されている。すなわち、最小二乗フィッティングとは、ある基準値の二乗和を最小にする基準によって曲線を当てはめる方法である。基準値としては、データと当てはめられた曲線によって推定される値との差の二乗和、すなわち残差平方和をとり、それを最小にするような曲線の係数、つまりフィッティング係数を数値計算により求める。

【 0 0 7 7 】

ここでは、この最小二乗フィッティングを、測定データからそのバックグラウンド信号を除去するために用いる。抽出したい光相関信号は、所定の基準値に対して上下に均等に振動する成分である。したがって、光相関信号にバックグラウンド信号が重ね合わされている場合、最小二乗フィッティングによりそのバックグラウンド信号をあらわす曲線を求めて、元の信号との差分をとることにより、適正な光相関信号を得ることができる。すなわち、最小二乗多項式フィッティングによりバックグラウンド信号 $S_{\text{BACK}, \text{FIT}}(n)$ を推定する。この $S_{\text{BACK}, \text{FIT}}(n)$ は、最小二乗フィッティングを用いて測定データより算出したバックグラウンド信号をあらわす曲線であり、例えば数 1 8 のような曲線式(多項式)を使用する。

【 0 0 7 8 】

【数 1 8】

$$S_{\text{BACK}, \text{FIT}}(x) = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2 + \cdots + A_{10} \cdot x^9 + A_{11} \cdot x^{10}$$

ここで、 $A_m (m = 0, 1, \dots, 10)$ は曲線式の係数で、最小二乗法により測定データから算出する。そして、数 1 7 において $K \cdot S_{\text{BACK}}(n) = S_{\text{BACK}, \text{FIT}}(n)$ として、 $S_{\text{LCOR}}(n)$ を求めた。

なお光相関信号抽出は、この最小二乗多項式フィッティングによらず、光相関信号を必要とするセンサとしての測定範囲に含んでいない実際の測定生波形データを使用し、この信号をバックグラウンド信号として数 1 7 により抽出する方法で行うこともできる。

〈ステップ S 2 : L P F 処理〉

次に、上述のようにして抽出した光相関信号 $[S_{LCOR}(n)]$ に不要な高周波成分が多く含まれる場合には、それをローパスフィルタ (L P F (low pass filter) : 低域通過フィルタ) により除去する。実験では、ノイズ分が少ないため、L P F 処理は行っていない。

【 0 0 7 9 】

〈ステップ S 3 : 最小または最大位置計算〉

図 8 (a) から分かるように、タングステンハロゲンランプ光源を使用した場合、非常に局所的な光相関信号波形が得られるため、波形の包絡線を求めて、その包絡線の最小値を計算するなどの必要なく、光相関信号波形またはその高周波不要成分を除去した信号から直接的に最小値を特定することができる。そのことによりヒルベルト変換等の信号処理も不要であり、信号処理時間の短縮化によるセンサの高速応答を実現することができる。

最小または最大位置検出 (ここでは波形の谷位置、すなわち、最小位置検出) の最も簡単な方法は、光相関信号波形に沿って、順次その傾き、すなわち直前の値との差分、を調べて極値をとる位置をさがせばよい。十分に滑らかな波形であればこの方法によって最小または最大位置を検出することができるが、実際の波形では雑音の影響で非常に多くの極値が現れることが多い。そのような場合には、波形の傾きを求める差分演算に適当な平滑化処理を併用する必要がある。

【 0 0 8 0 】

平滑化処理には、各種の手法があるが、例えばサビツキー (Savitzky) とゴレー (Golay) による平滑化微分法によるものがある。この場合は、平滑化微分した信号波形のゼロ位置が極値となる。詳細は、文献「科学計測のための波形データ処理」, 南茂夫編集, C Q 出版株式会社 (1986) に記載されている。

すなわち、ステップ S 2 にて L P F 処理を施した信号 $[S_{LCOR,LPF}(n)]$ の最小または最大位置を求めるために平滑化微分処理を行う。平滑化微分とは、多項式適合平滑化法に基づき、観測波形、つまり測定データ、の微分波形を求める手法であり、求められる微分波形では同時に平滑化も施されている。

ここで、多項式適合平滑化法とは、観測波形の中から高周波信号成分を除去し

、波形を滑らかにする平滑化手法の一つである。一つの測定点の平滑値を、この点の両側近傍での測定値を使い最小二乗法により多項式に当てはめて求める。これを測定点ごとに順次求めて全体の平滑波形を求める。

次に、平滑化微分した時系列信号から、そのゼロ点位置を算出する。すなわち、平滑化微分した時系列信号の双極性の波形がレベル零の基線と交差する点が求める最小または最大位置に相当する。

上述に従って、光反射式ファブリペロー型ロードセルを試作し、図 1 に示す測定系を用い、上述した信号処理を行って、負荷荷重に対する光相関信号の最小または最大位置を求めた試験およびデータ処理結果を図 9 に示す。

上述した方法は、図 1 に示した構成に限らず、信号復調部の干渉計として、ウェッジ型ファブリペロー干渉計（フィゾー干渉計）またはマイケルソン型干渉計を用いるようにしても上述と同様に実施することができる。

【 0 0 8 1 】

図 1 0 は、信号復調部の干渉計をウェッジ型ファブリペロー干渉計とした本発明の第 2 の実施の形態に係る光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルとして構成した光ファイバ干渉センサシステムの構成を示している。

図 1 0 において、光源 1、第 1 の光ファイバ 2、 $[2 \times 2]$ カプラ 3、第 2 の光ファイバ 4、第 3 の光ファイバ 5、ファブリペロー型ロードセル 6 および第 4 の光ファイバ 7 は、図 1 と同様であり、図 1 におけるギャップ可変ファブリペロー型干渉計 8、光検出器 9 および光パワーメータ 1 0 からなる信号復調部の構成に代えて、コリメートレンズ 2 1、フォーカスレンズ 2 2、フィゾー干渉計 2 3、リニアイメージセンサ 2 4 およびイメージセンサ制御部 2 5 からなる信号復調部を設けている。

なお、図 1 0 の A/D 変換器 1 1 A および信号処理部 1 2 A は、図 1 における A/D 変換器 1 1 および信号処理部 1 2 と実質的な機能は同等であるが、リニアイメージセンサ 2 4 およびイメージセンサ制御部 2 5 から与えられる信号形態が、光パワーメータ 1 0 の出力とは若干異なるため、該信号形態に応じた処理を行なうように変形している。

【 0 0 8 2 】

すなわち、第4の光ファイバ7は、ファブリペロー型ロードセル6から〔2×2〕カプラ3に入力された波長変調された光信号を、〔2×2〕カプラ3の第4ポートから光信号復調部のコリメートレンズ21に導き、入射させる。

コリメートレンズ21は、第4の光ファイバ7から射出された光をコリメートする。フォーカスレンズ22は、例えばシリンドリカルレンズ等からなり、コリメートレンズ21でコリメートされた光を直線状に集光して、フィゾー干渉計23に入射する。これらコリメートレンズ21およびフォーカスレンズ22は、第4の光ファイバ7の先端から放射された光束を集光する集光光学系を構成する。

フィゾー干渉計23は、部分反射面が平行平面で対峙してギャップを形成するのではなく、部分反射面が微小角度の傾斜角を持って対峙することにより、変位によってギャップ間隙が漸次相違するウェッジ、すなわちくさび状のギャップを形成するウェッジ型ファブリペロー干渉計である。このフィゾー干渉計23は、フォーカスレンズ22で集光された直線方向が傾斜方向に一致、すなわち該直線方向が等ギャップ線に直交するように配設される。

【0083】

フィゾー干渉計23では、直線状に集光された光が、ウェッジ状のギャップの各位置において多重反射して波長スペクトル特性との光相関を生じ、ファブリペロー型ロードセル6におけるギャップの間隙寸法と一致する間隙となる位置で光強度が最小となる。フィゾー干渉計23は、例えば両面研磨された平行平面基板を2枚使用し、これら平行平面基板の各々の片面に誘電体薄膜等からなる部分反射膜を成膜し、それらの部分反射膜面同士を対面させ、一端に細線を挟み込んで突き合わせることでウェッジ状のギャップを形成することにより作製することができる。

リニアイメージセンサ24は、例えば直線状のCCD (charge coupled device: 電荷結合素子) イメージセンサ、すなわちCCDラインセンサ、を用い、フォーカスレンズ22により集光された直線状の像のうち、フィゾー干渉計23により光強度が最小となる位置を検出する。なお、CCDラインセンサは、直線状に配列されたアレイ受光部に照射された光により発生した電荷を、そこに配置された電極にクロック信号を与えて、BBD (bucket brigade device: バケツリ

レー素子)のように、逐次移動させ、電気信号としてシーケンシャルに取り出す。したがって、CCDラインセンサの出力は時系列信号となる。信号をシーケンシャルに読み出すため、スキャンレートが高いほど高速応答が可能となる。

【0084】

イメージセンサ制御部25は、CCDラインセンサ等のリニアイメージセンサ11を駆動制御して、ライン状のイメージ情報、つまり直線に沿う光強度分布情報、を時系列に出力する。このイメージセンサ制御部25は、タイミングジェネレータ(図示せず)を内蔵し、例えば、リニアイメージセンサ24、A/D変換器11Aおよびイメージセンサ制御部25内の各部に動作クロック等のタイミング信号を供給する。このイメージセンサ制御部25は、例えば、リニアイメージセンサ24がCCDラインセンサである場合には、CCD制御部となる。リニアイメージセンサ24は、イメージセンサ制御部25のタイミングジェネレータから供給されるタイミング信号に応動して、イメージ情報の読み取りおよび出力を実行する。

イメージセンサ制御部25は、タイミングジェネレータのクロック等のタイミング信号に従って動作し、例えば、入力信号を増幅し且つクランプするプリアンプ(前置増幅器)/クランプ回路、クランプした信号を相関二重サンプリングする相関二重サンプリング回路、相関二重サンプリングした信号のオフセットを調整するオフセット調整部および出力のゲインを調整するゲイン調整回路等を有して構成される。

【0085】

A/D変換器11Aは、イメージセンサ制御部25のタイミングジェネレータから供給されるタイミング信号に応動して、リニアイメージセンサ24で読み取りイメージセンサ制御部25で処理したイメージ情報をデジタル情報に変換する。

信号処理部12Aは、A/D変換器11AによりA/D変換された信号を処理して、計測結果を得る。信号処理部12Aは、リニアイメージセンサ24からイメージセンサ制御部25を介して得られる時系列の信号から所要の光相関信号を抽出し、その光相関信号の高周波のノイズ成分をローパスフィルタ処理により除

去し、且つ、平滑化微分と零クロス検出などによりその信号の最小または最大位置を求める。

図 1 1 は、信号復調部の干渉計をマイケルソン型干渉計とした本発明の第 3 の実施の形態に係る光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルとして構成した光ファイバ干渉センサシステムの構成を示している。

【0086】

図 1 1 において、光源 1、第 1 の光ファイバ 2、 $[2 \times 2]$ カブラ 3、第 2 の光ファイバ 4、第 3 の光ファイバ 5、ファブリペロー型ロードセル 6、第 4 の光ファイバ 7 および光パワーメータ 10 は、図 1 と同様であり、図 1 におけるギャップ可変ファブリペロー型干渉計 8 および光検出器 9 からなる構成に代えて、マイケルソン型干渉計 31 を設けている。

マイケルソン型干渉計 31 は、第 1 のレンズ 31 a、第 2 のレンズ 31 b、ビームスプリッタ 31 c、第 1 のミラー 31 d、第 2 のミラー 31 e および光検出器 31 f を有している。

マイケルソン型干渉計 31 は、最初に入射した光（光ファイバ 7 からの射出光）を第 31 のレンズ 31 a で、平行光とし、ビームスプリッタ 31 c により互いに直交する 2 方向に分岐させる。分岐した光は、それぞれ第 1 のミラー（反射鏡）31 d および第 2 のミラー 31 e で反射し、再びビームスプリッタ 31 c に戻ってくる。ビームスプリッタ 31 c に戻ってきた 2 つの光は重なり合っ光検出器 31 f に入射する。ピエゾアクチュエータ（図示していない）等により、一方の例えば第 2 のミラー 31 d を移動させることにより、2 つに分岐した光の光路差がセンサであるファブリペロー型ロードセル 6 のギャップ間隙に対応する個所近傍で上述と同様の光相関信号を得ることができる。この光相関信号が光検出器 31 f から光パワーメータ 10 に与えられる。

【0087】

光パワーメータ 10 は、マイケルソン型干渉計 31 の光検出器 31 f の出力を計測する。なお、図 1 1 の A/D 変換器 11 A および信号処理部 12 A は、図 10 と同様でよい。

なお、この発明の光ファイバ干渉センサの信号処理システムは、専用のシステ

ムとして構成する代りに、通常のコンピュータシステムを用いて実現することができる。例えば、コンピュータシステムに上述の動作を実行するためのプログラムを格納したフロッピーディスク、CD-ROM、MO、DVD等の媒体から該プログラムをインストールすることにより、上述の処理を実行する光ファイバ干渉センサの信号処理システムを構築するようにしてもよい。インストールによって、当該プログラムは、コンピュータシステム内のハードディスク等の媒体に格納されて、光ファイバ干渉センサの信号処理システムを構成し、実行に供される。

【0088】

また、当該プログラムを、インターネット等の通信ネットワーク上に設けたFTP (File Transfer Protocol) サーバに登録し、FTPクライアントにネットワークを介して配信するようにしてもよい。該プログラムを、通信ネットワークの電子掲示板(BBS: Bulletin Board System)等に登録し、これをネットワークを介して配信するようにしてもよい。そして、このプログラムを起動し、OS (Operating System) の制御下において実行することにより、上述の処理を達成することが可能となる。さらに、プログラムを通信ネットワークを介して転送しながら起動実行することによっても、上述の処理を達成することができる。

【0089】

【発明の効果】

以上述べたように、本発明によれば、簡単な構成で、低周波のゆらぎおよびノイズ等の不要な信号成分による影響を効果的に抑制し、光学系の簡易な調整および検出信号の簡単な信号処理によって、高精度な測定結果を得ることを可能とする光ファイバ干渉センサ、光ファイバ干渉センサの信号処理システム、方法および記録媒体を提供することができる。

すなわち、本発明の請求項1による光ファイバ干渉センサによれば、力、ひずみ、圧力および温度等の物理量により変動する被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対

応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を検出して、前記被計測間隙を求め、前記物理量の大きさを計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサにおいて、前記低コヒーレンス光源として、波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ光相関信号抽出手段により前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出し、極値位置算出手段により前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求めることにより、簡単な構成で、低周波のゆらぎおよびノイズ等の不要な信号成分による影響を効果的に抑制し、光学系の簡易な調整および検出信号の簡単な信号処理によって、高精度な測定結果を得ることを可能とし、特に、信号処理系を含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることが可能となる。

【 0 0 9 0 】

また、本発明の請求項 2 による光ファイバ干渉センサによれば、ファブリペロー型の光ファイバ干渉センサにおいて、前記低コヒーレンス光源として、波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ光相関信号抽出手段により、前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出し、高周波成分除去処理手段により、前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去して、極値位置算出手段により、前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求めることにより、特に、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことができる。

【 0 0 9 1 】

本発明の請求項 3 による光ファイバ干渉センサによれば、前記広帯域光源が、ハロゲンランプおよび白色発光ダイオードのうちのいずれかであることにより、特に、高精度の測定を、簡単な構成で実現することができる。

本発明の請求項 4 による光ファイバ干渉センサによれば、前記光相関信号抽出手段が、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するバックグラウンド信号除去手段を含むことにより、特に

、不要成分を一層効果的に除去または抑制することができる。

本発明の請求項 5 による光ファイバ干渉センサによれば、前記バックグラウンド信号除去手段が、最小二乗多項式フィッティングによりバックグラウンド信号を推定して、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含むことにより、特に、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現することができる。

本発明の請求項 6 による光ファイバ干渉センサによれば、前記バックグラウンド信号除去手段が、所要の計測範囲に光相関信号を含まない状態での実測生データをバックグラウンド信号として、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含むことにより、特に、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現することができる。

【 0 0 9 2 】

本発明の請求項 7 による光ファイバ干渉センサによれば、

前記極値位置算出手段が、

前記光相関信号を多項式適合平滑化法に基づいて平滑化微分処理する平滑化微分処理手段と、

前記平滑化微分処理手段の出力がレベル零と交わる零クロス点を求める零クロス点算出手段と

を含む構成により、特に、不要成分をさらに効果的に除去または抑制し、高精度の測定を実現することができる。

本発明の請求項 8 による光ファイバ干渉センサによれば、前記高周波成分除去処理手段が、ローパスフィルタを含むことにより、特に、高精度の測定を、簡易な構成で実現することができる。

【 0 0 9 3 】

さらに、本発明の請求項 9 による光ファイバ干渉センサの信号処理システムによれば、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファ

イバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、前記コヒーレンス光源として波長スペクトル分布が広い広帯域光源を用い、且つ光相関信号抽出手段によって、前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出し、極値位置算出手段によって前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求めることにより、特に、信号処理系を含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることが可能となる。

【 0 0 9 4 】

また、本発明の請求項 1 0 による光ファイバ干渉センサの信号処理システムによれば、被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、前記コヒーレンス光源として波長スペクトル分布が広い広帯域コヒーレンス光源を用い光相関信号抽出手段によって、前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出し、高周波成分除去処理手段によって、前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去して、極値位置算出手段によって、前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求めることにより、特に、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことができる。

【 0 0 9 5 】

前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、前記光相関信号抽出手段を、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するバックグラウンド信号除去手段を含むように構成すれば、不要成分を一層効果的に除去または抑制することができる。

また、前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、前記バックグラウンド信号除去手段が、最小二乗多項式フィッティングによりバックグラウンド信号を推定して、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含む構成とすれば、特に、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現することができる。

また、前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、前記バックグラウンド信号除去手段が、所要の計測範囲に光相関信号を含まない状態での実測生データをバックグラウンド信号として、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去する手段を含む構成とすれば、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現することができる。

【 0 0 9 6 】

また、前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、

前記極値位置算出手段が、

前記光相関信号を多項式適合平滑化法に基づいて平滑化微分処理する平滑化微分処理手段と、

前記平滑化微分処理手段の出力がレベル零と交わる零クロス点を求める零クロス点算出手段と

を含む構成とすることにより、特に、不要成分をさらに効果的に除去または抑制し、高精度の測定を実現することができる。

さらに、前記光ファイバ干渉センサの信号処理システムにおいて、前記高周波成分除去処理手段が、ローパスフィルタを含む構成とすることにより、特に、高精度の測定を、簡易な構成で実現し得る。

【 0 0 9 7 】

さらにまた、本発明の請求項 1 1 による光ファイバ干渉センサの信号処理方法

によれば、被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出ステップと、

前記光相関信号抽出ステップで抽出された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出ステップと
を有する構成により、特に、信号処理系を含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることが可能となる。

【 0 0 9 8 】

また、本発明の請求項 1 2 による光ファイバ干渉センサの信号処理方法によれば、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出ステップと、

前記光相関信号抽出ステップにより抽出される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理ステップと、

前記高周波成分除去処理ステップにより高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出ステップと

を有する構成により、特に、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことができる。

【 0 0 9 9 】

前記光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、前記光相関信号抽出ステップが、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するバックグラウンド信号除去ステップを含む構成とすることにより、特に、不要成分を一層効果的に除去または抑制することができる。

また、前記光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、前記バックグラウンド信号除去ステップが、最小二乗多項式フィッティングによりバックグラウンド信号を推定して、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するステップを含むように構成することにより、特に、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現することができる。

また、前記光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、前記バックグラウンド信号除去ステップが、所要の計測範囲に光相関信号を含まない状態での実測生データをバックグラウンド信号として、前記光強度センサの出力から、前記被計測間隙により変化するバックグラウンド信号を除去するステップを含むように構成することにより、特に、不要成分の除去または抑制を簡単で且つ効果的な処理で実現することができる。

【 0 1 0 0 】

また、前記光ファイバ干渉センサの信号処理方法において、

前記極値位置算出ステップが、

前記光相関信号を多項式適合平滑化法に基づいて平滑化微分処理する平滑化微分処理ステップと、

前記平滑化微分処理ステップにより平滑化された信号がレベル零と交わる零クロス点を求める零クロス点算出ステップと

を含むように構成することにより、特に、不要成分をさらに効果的に除去または抑制し、高精度の測定を実現することができる。

【 0 1 0 1 】

その上また、本発明の請求項 1 3 によるコンピュータ読み取り可能な記録媒体によれば、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理にあたり、コンピュータを、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段、および

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段
として機能させるためのプログラムを記録し、実行することにより、特に、コンピュータによる光ファイバ干渉センサの信号処理について、信号処理系も含めて簡単な構成でも高精度な測定結果を得ることが可能となる。

【 0 1 0 2 】

また、本発明の請求項 1 4 によるコンピュータ読み取り可能な記録媒体によれば、

被計測間隙を存し、平行平面をなして光ファイバの端面を対峙させ且つ該光ファイバの対峙する端面に部分反射ミラーを形成してなるセンサ部の一方の光ファイバに、波長スペクトル分布が広い広帯域の低コヒーレンス光源の光を導き、前記被計測間隙における多重反射により、前記被計測間隙の間隙寸法に対応して波長変調された反射光または透過光のいずれかを光ファイバにて導き、光強度センサにより間隙変化に対応する時系列の光強度を得て光強度最小位置または光強度

最大位置を求めて、前記被計測間隙を計測するファブリペロー型の光ファイバ干渉センサの信号処理にあたり、コンピュータを、

前記光強度センサの時系列の出力信号から所要の光相関信号を抽出する光相関信号抽出手段、

前記光相関信号抽出手段から出力される光相関信号における高周波の不要成分を除去する高周波成分除去処理手段、および

前記高周波成分除去処理手段から出力される高周波の不要成分が除去された光相関信号から、該光相関信号における最小または最大位置を求める極値位置算出手段

として機能させるためのプログラムを記録し、実行することにより、特に、コンピュータによる光ファイバ干渉センサの信号処理について、計測信号に高周波の不要成分が含まれる場合にも有効に測定を行なうことが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の第 1 の実施の形態に係る光ファイバ干渉センサを適用した光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルの構成を示すブロック図である。

【図 2】

図 1 の光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルの信号処理部の詳細な構成を示すブロック図である。

【図 3】

図 1 の光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルの主として信号処理部における信号処理の流れを示すフローチャートである。

【図 4】

図 1 の光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルの実測に使用した光源の光ファイバを導波した後の波長成分の分布を示す波長スペクトル図である。

【図 5】

図 1 の光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルにおける、負荷荷重をかけたときのタングステン—ハロゲンランプ (a)、LED (b) および S

L D (c) の各光源における光パワーメータの信号出力の生データをそれぞれ示す図である。

【図 6】

図 1 の光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルにおいて、各光源 (a) 、 (b) および (c) について、時系列の出力信号データから抽出した光相関信号波形をそれぞれ示す図である。

【図 7】

図 1 の光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルにおいて、各光源 (a) 、 (b) および (c) について、バックグラウンド信号を除去した信号波形をそれぞれ示す図である。

【図 8】

図 1 の光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルにおいて、各光源 (a) 、 (b) および (c) について、バックグラウンド信号を除去した光相関信号波形をそれぞれ詳細に示す図である。

【図 9】

図 1 の光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルにおいて、図 1 の測定系を試作し信号処理を行って、負荷荷重に対するギャップ間隔およびそのデータ処理結果を示す図である。

【図 1 0】

本発明の第 2 の実施の形態に係るウェッジ型ファブリペロー干渉計を用いた光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルの構成を示すブロック図である。

【図 1 1】

本発明の第 3 の実施の形態に係るマイケルソン型干渉計を用いた光反射式ファブリペロー型光ファイバ干渉ロードセルの構成を示すブロック図である。

【図 1 2】

従来のファブリペロー型光ファイバ干渉ひずみセンサシステムの概略的な構成を示すブロック図である。

【図 1 3】

図 1 2 に示したファブリペロー干渉計の具体的な構成を説明するための模式的断面図である。

【図 1 4】

ファブリペロー型光ファイバー干渉ひずみセンサの検出原理を説明するための模式図である。

【図 1 5】

光源の波長スペクトルがガウス分布を有するとしたセンサシステム出力のシミュレーションの例を示す図である。

【図 1 6】

ファブリペロー型光ファイバー干渉ひずみセンサのひずみ検出動作原理を説明するための模式図である。

【図 1 7】

ギャップ間隙を変えたときの光の波長に対する透過係数の変化の計算例を示す図である。

【図 1 8】

ギャップ間隙を変えたときの光の波長に対する反射係数の変化の計算例を示す図である。

【図 1 9】

波長に対してガウス分布を有する光源の波長スペクトルおよびギャップ間隙を変えたときの、光の波長に対する透過スペクトル強度分布を示す図である。

【図 2 0】

波長に対してガウス分布を有する光源の波長スペクトルおよびギャップ間隙を変えたときの、光の波長に対する反射スペクトル強度分布の計算例を示す図である。

【図 2 1】

透過型計測システムの構成を示す模式的なブロック図である。

【図 2 2】

反射型計測システムの構成を示す模式的なブロック図である。

【図 2 3】

センサ計測システムにおける信号出力をシミュレートした出力例を示す図である。

【図 2 4】

光相関信号とゼロパスレングス干渉との違いについての比較確認試験の計測ブロック図である。

【図 2 5】

図 2 4 に示した計測システムにおいて、ギャップ可変ファブリペロー干渉計のギャップ間隙寸法を微小変化させつつ測定した場合の光パワーメータ出力の変動を示す図である。

【図 2 6】

種々の光源 (a)、(b)、(c)、(d) のスペクトル分布を比較するための波形図である。

【図 2 7】

光源スペクトルの相違による信号出力を比較シミュレーションした結果を示す波形図である。

【図 2 8】

光源スペクトルの相違による信号出力を比較シミュレーションした結果を一部を拡大して示す波形図である。

【図 2 9】

発光ダイオード光源のスペクトル分布を比較するための波形図である。

【図 3 0】

スペクトル分布の異なる発光ダイオード光源による光相関信号を比較するための波形図である。

【符号の説明】

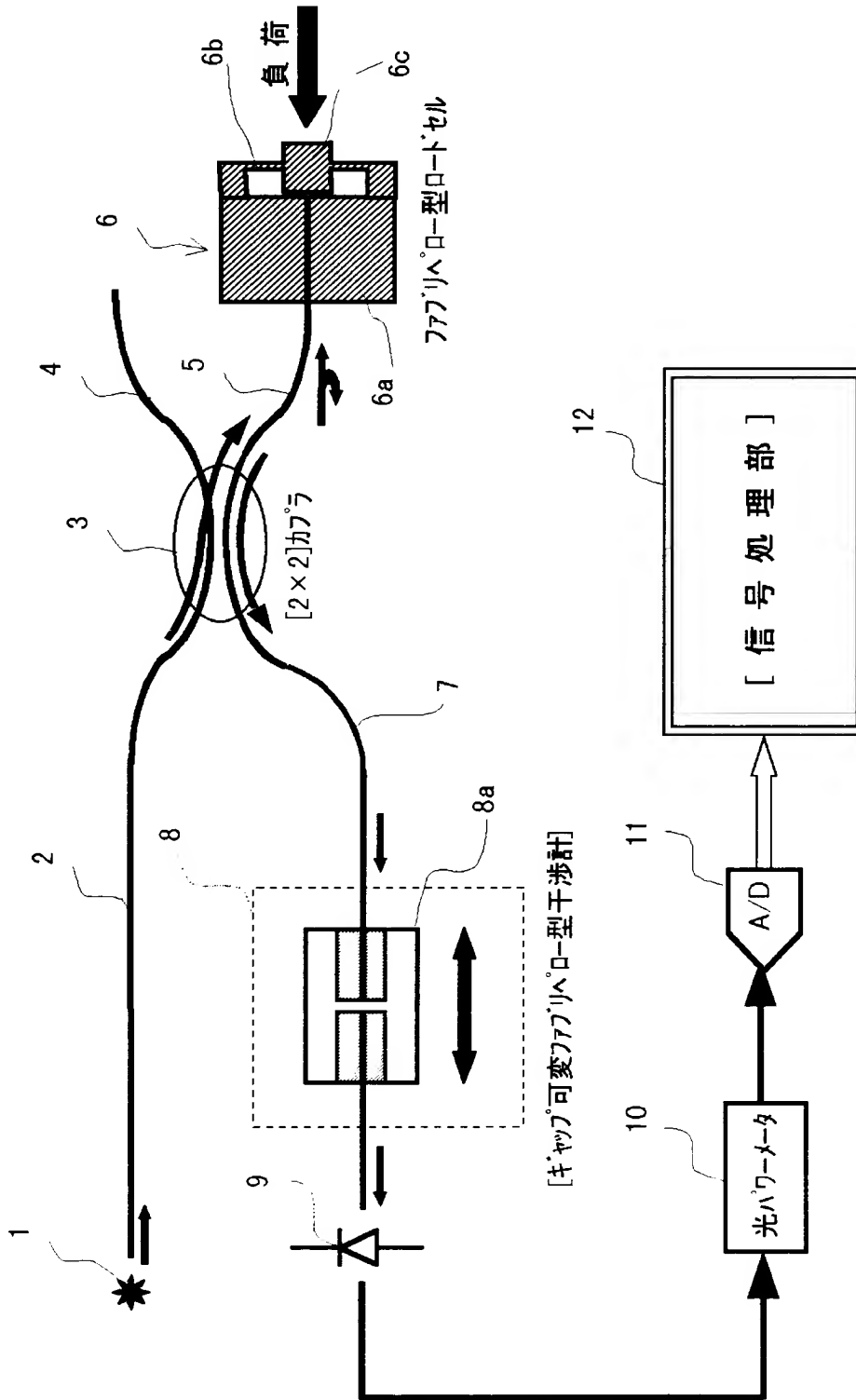
- 1 光源
- 2 第 1 の光ファイバ
- 3 [2×2] カブラ
- 4 第 2 の光ファイバ
- 5 第 3 の光ファイバ

- 6 ファブリペロー型ロードセル
- 7 第4の光ファイバ
- 8 ギャップ可変ファブリペロー型干渉計
- 9 光検出器
- 10 光パワーメータ
- 11, 11A A/D (アナログーデジタル) 変換器
- 12, 12A 信号処理部
- 21 コリメートレンズ
- 22 フォーカスレンズ
- 23 フィゾー干渉計
- 24 リニアイメージセンサ
- 25 イメージセンサ制御部
- 31 マイケルソン型干渉計
- 121 DSP (デジタルシグナルプロセッサ)
- 122 データメモリ
- 123 校正データメモリ
- 124 プログラムメモリ
- 125 表示器
- 126 D/A (デジタルーアナログ) 変換器

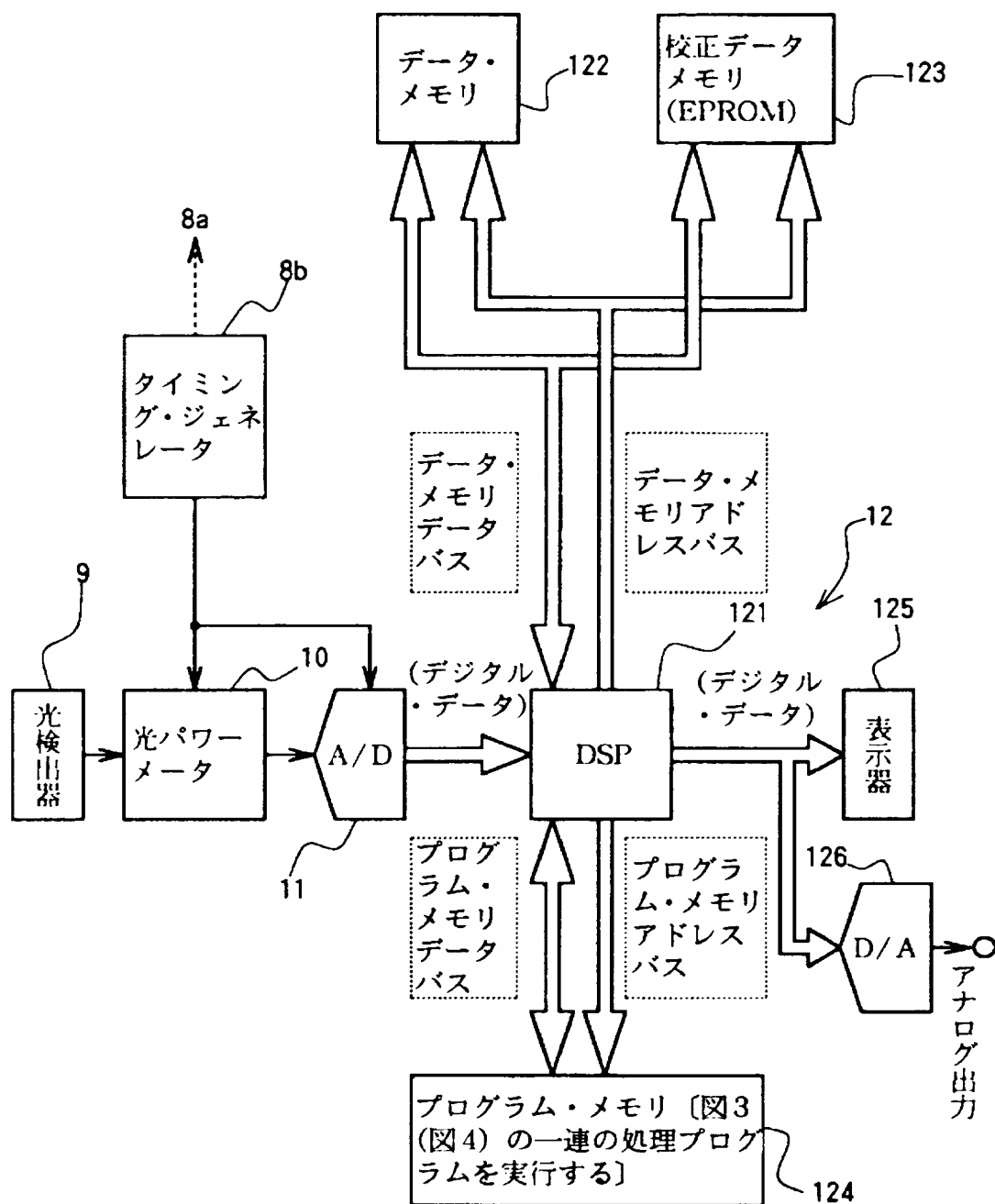
【書類名】

図面

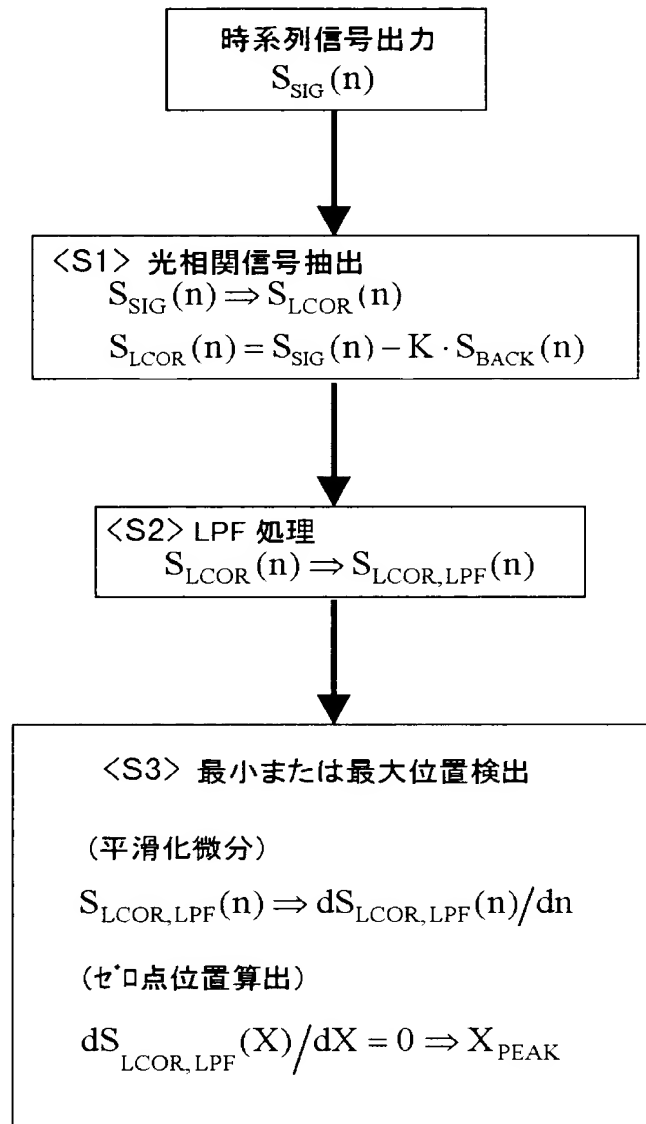
【図 1】



【図 2】

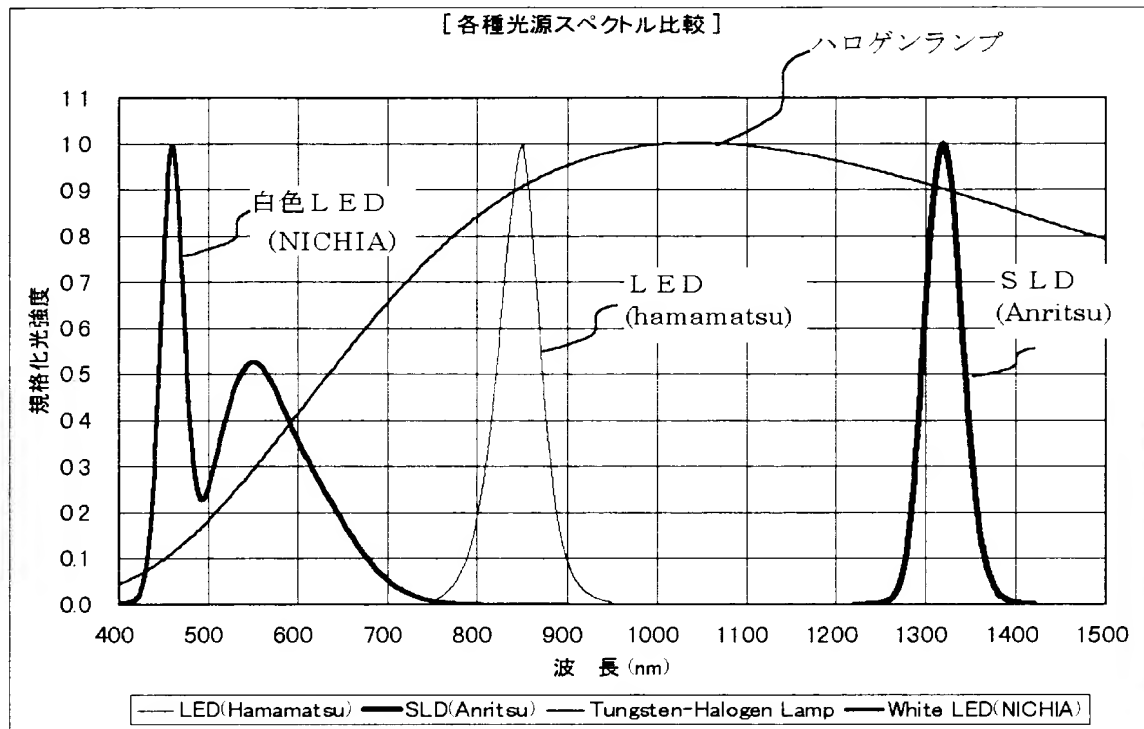


【図 3】



信号処理フロー

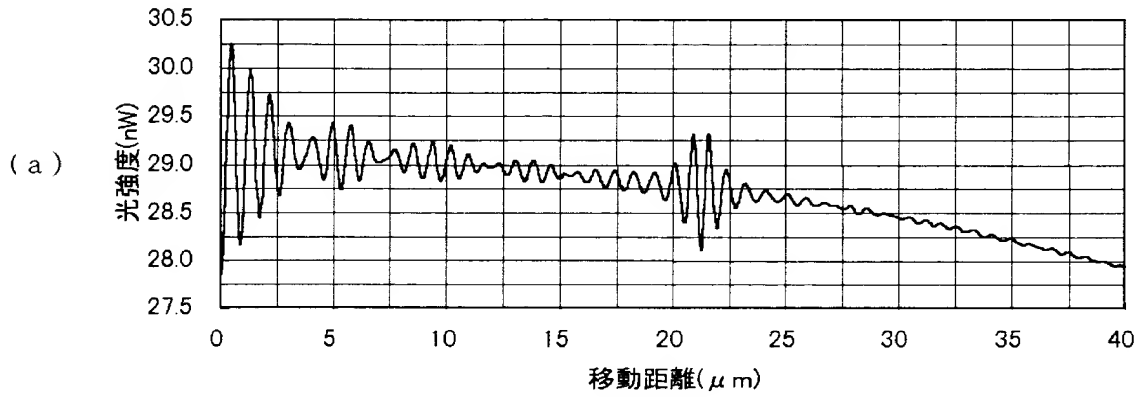
【図 4】



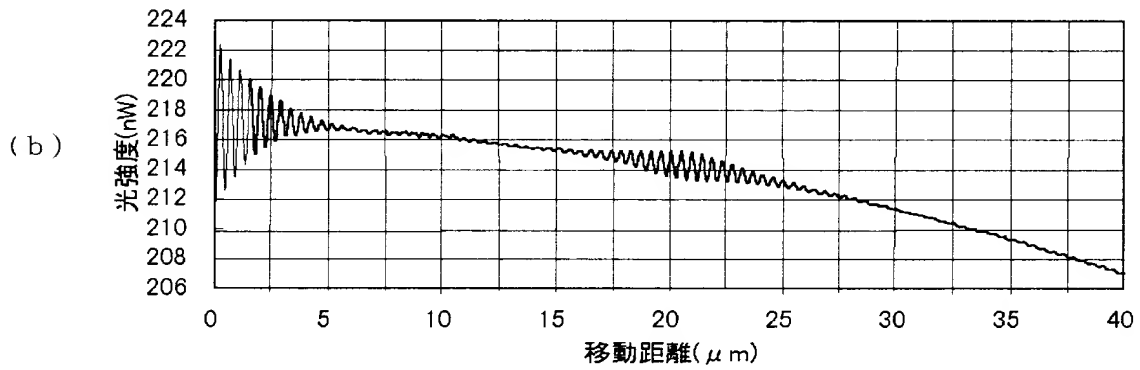
各 種 光 源 比 較

【図 5】

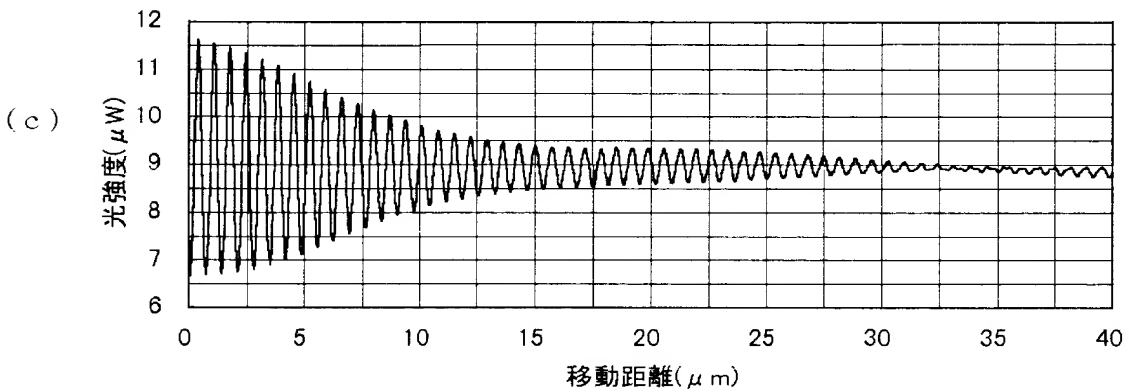
< Tungsten-Halogen Lamp 光源 >



< LED 光源(HAMAMATSU) >

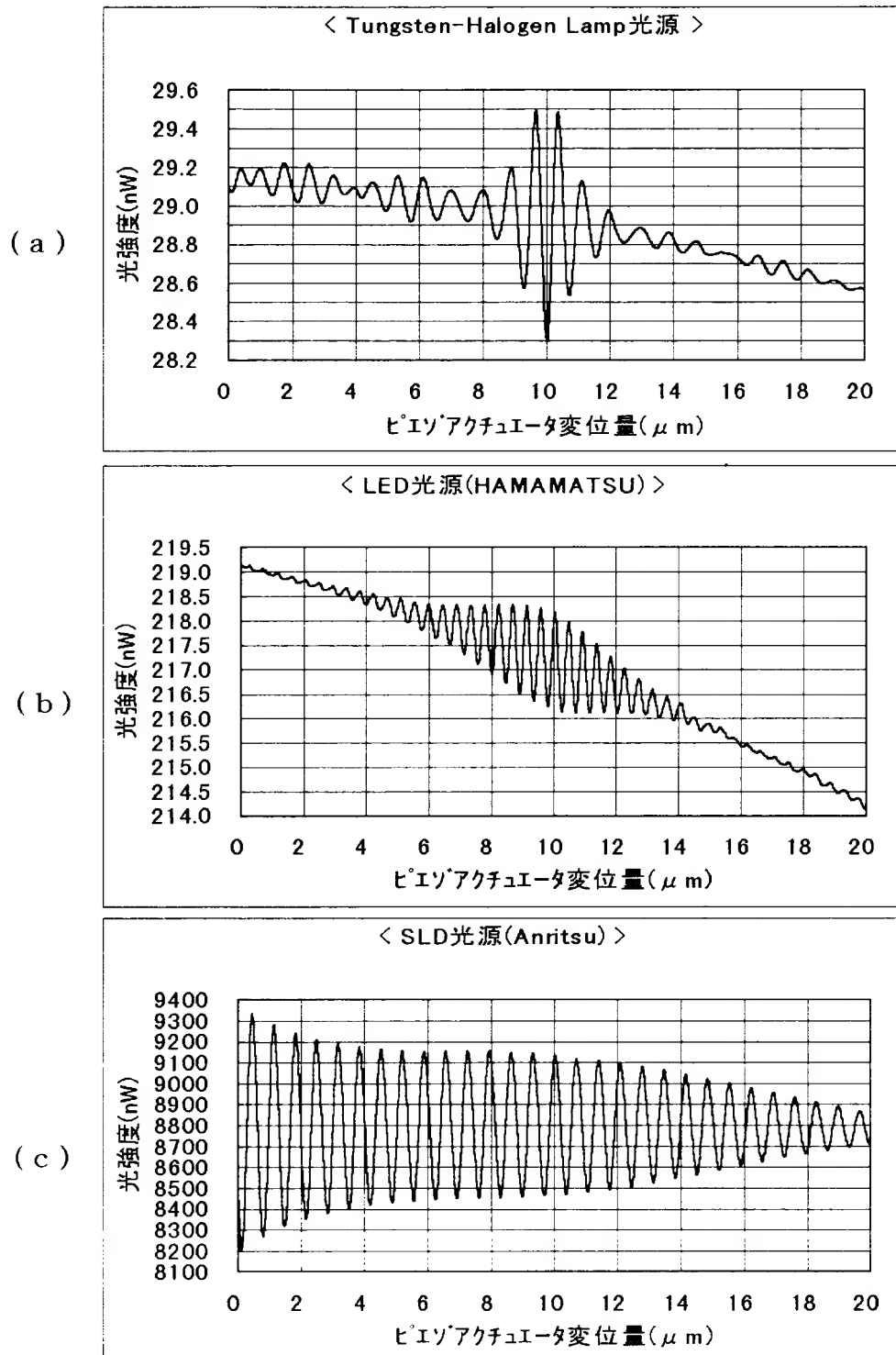


< SLD 光源(Anritsu) >



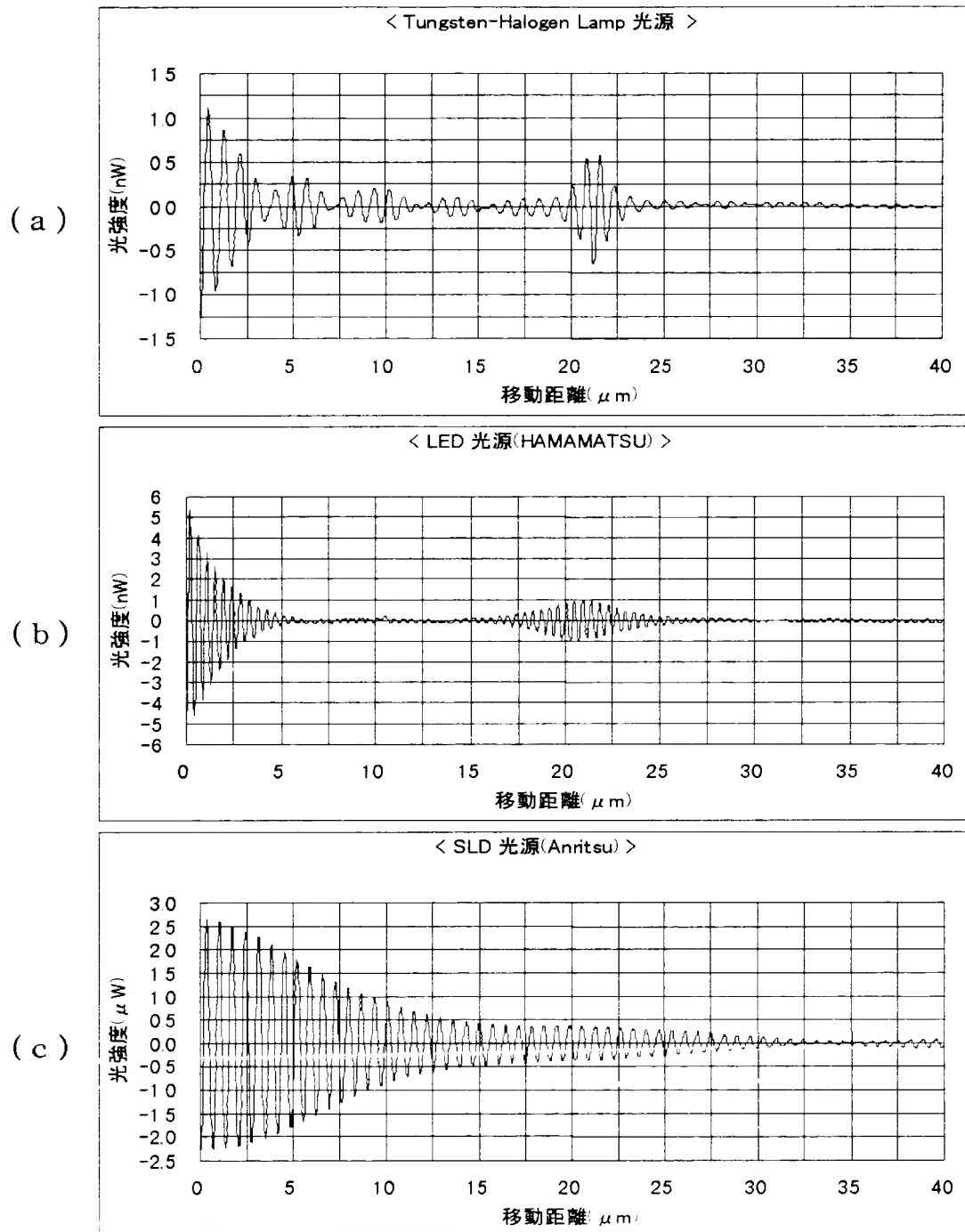
光源の違いによる信号出力比較

【図 6】



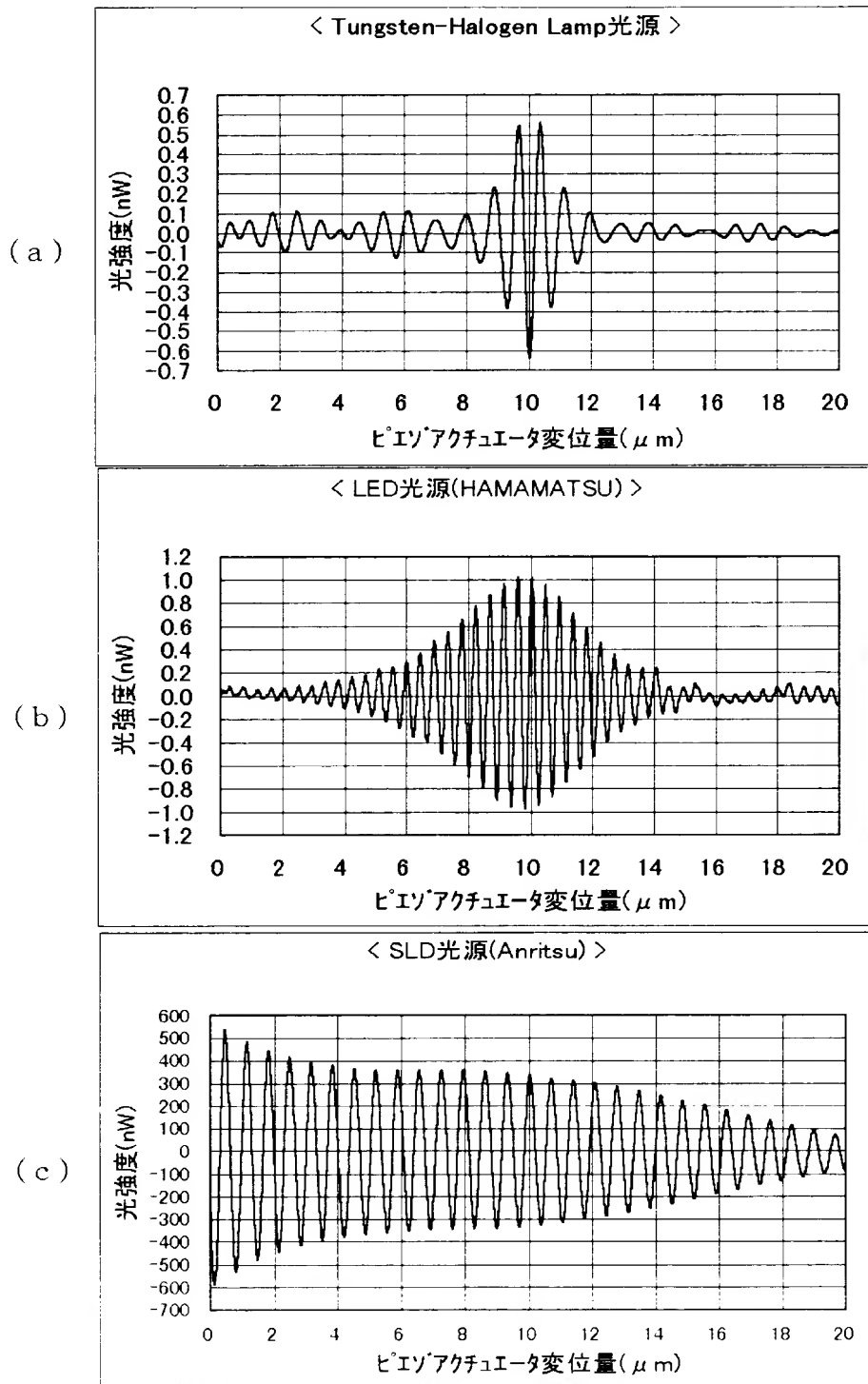
光源の違いによる光相関信号比較

【図 7】



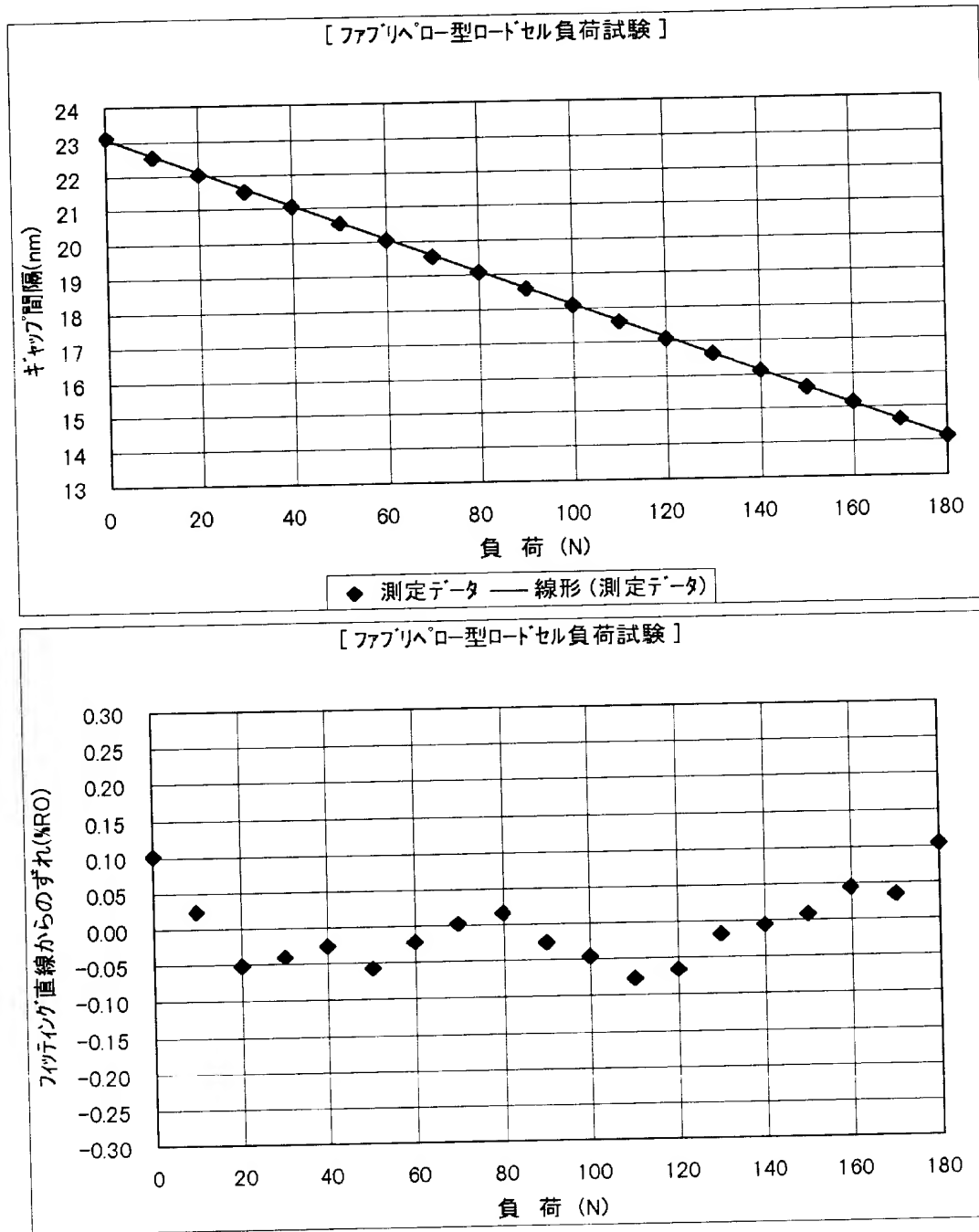
バックグラウンド信号を除去した信号出力比較

【図 8】



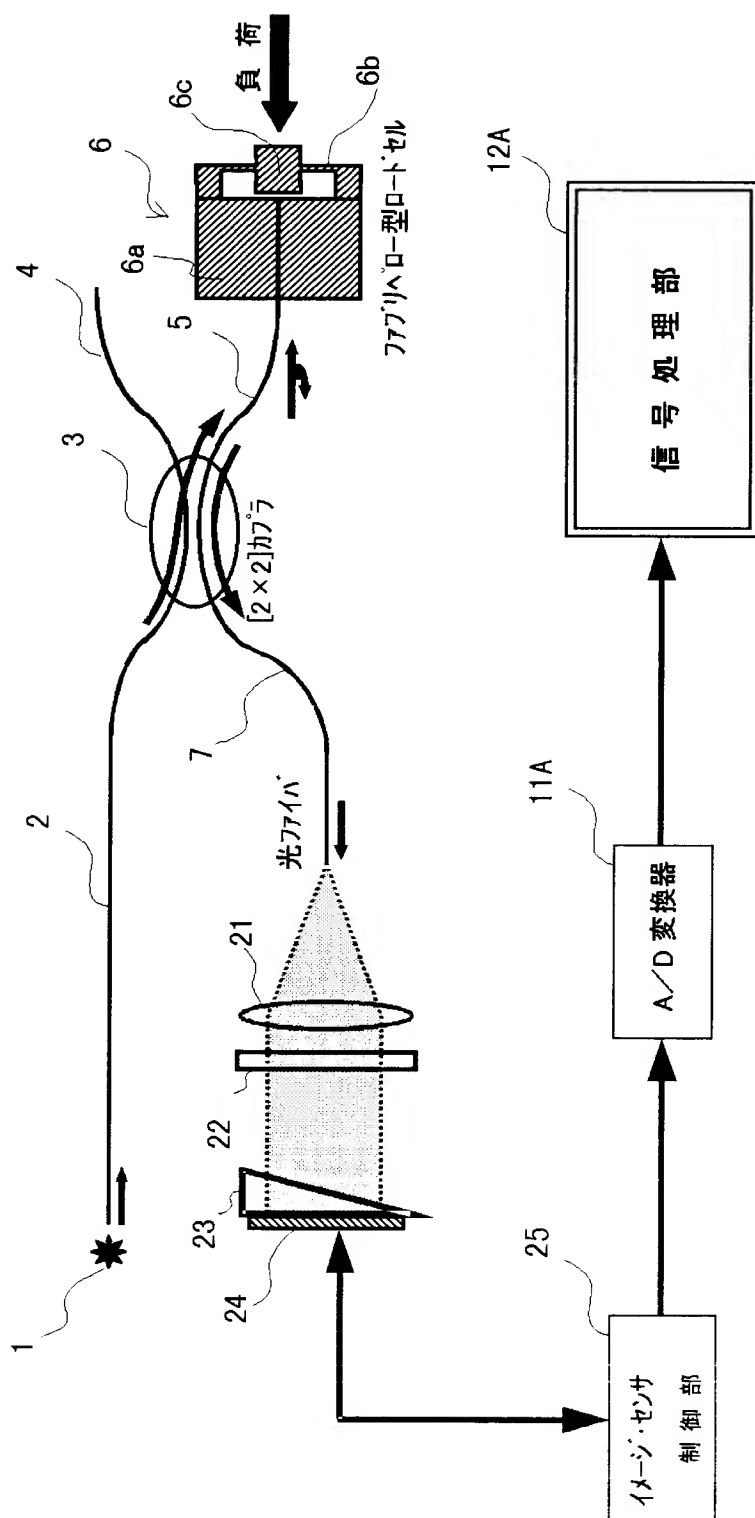
バックグラウンド信号を除去した光相関信号比較

【図 9】

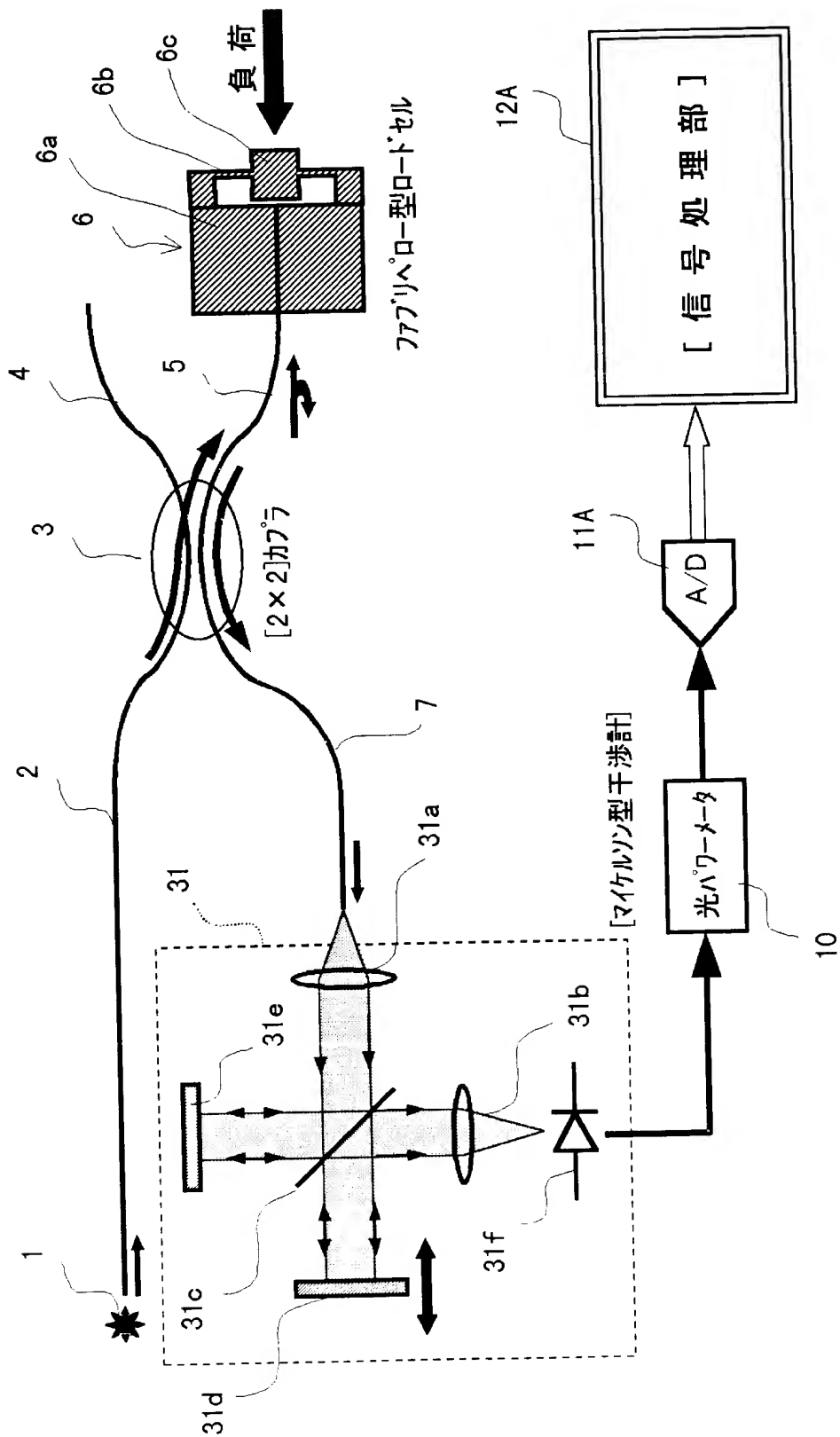


ファブリペロー型ロードセル負荷試験結果

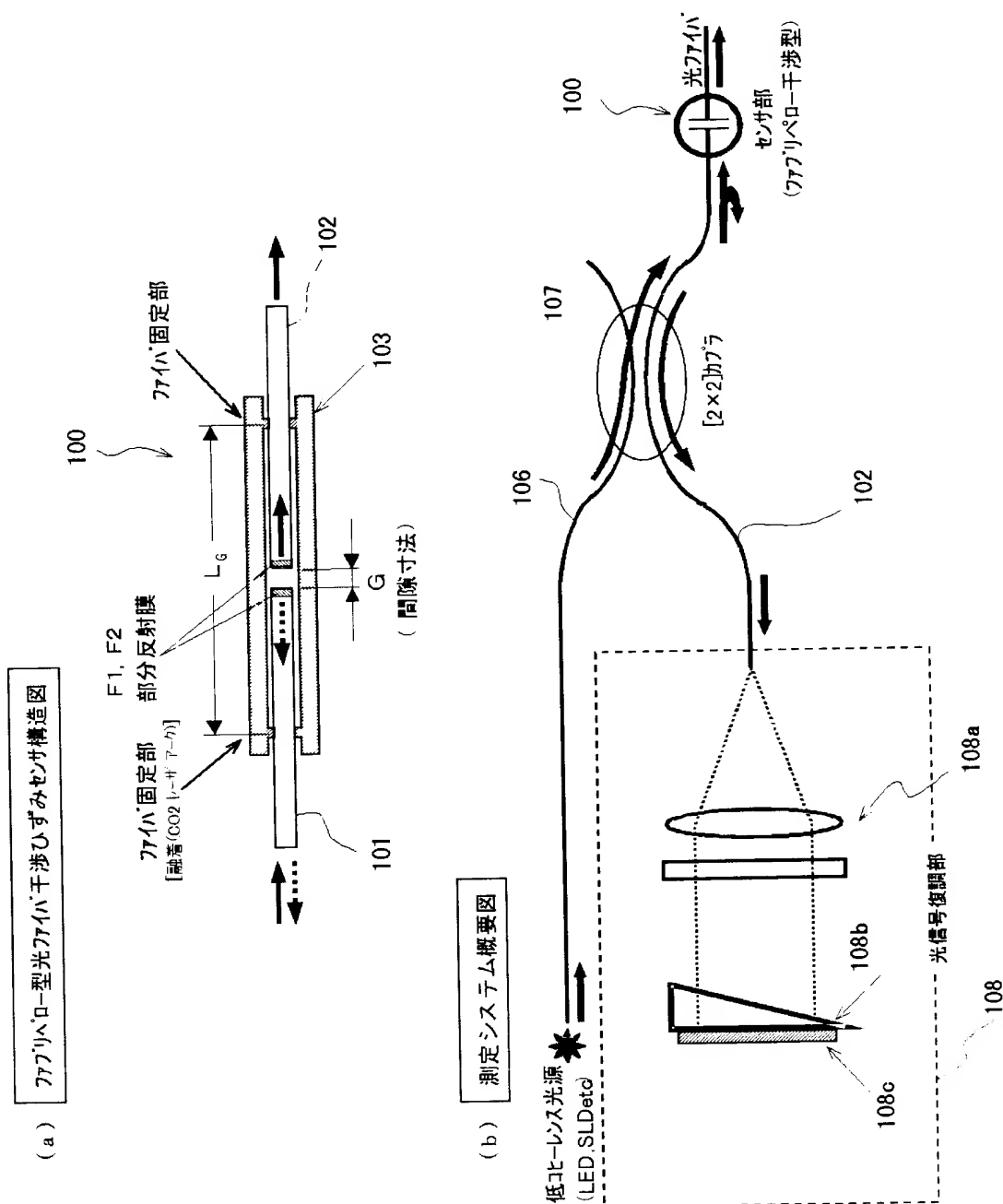
【図10】



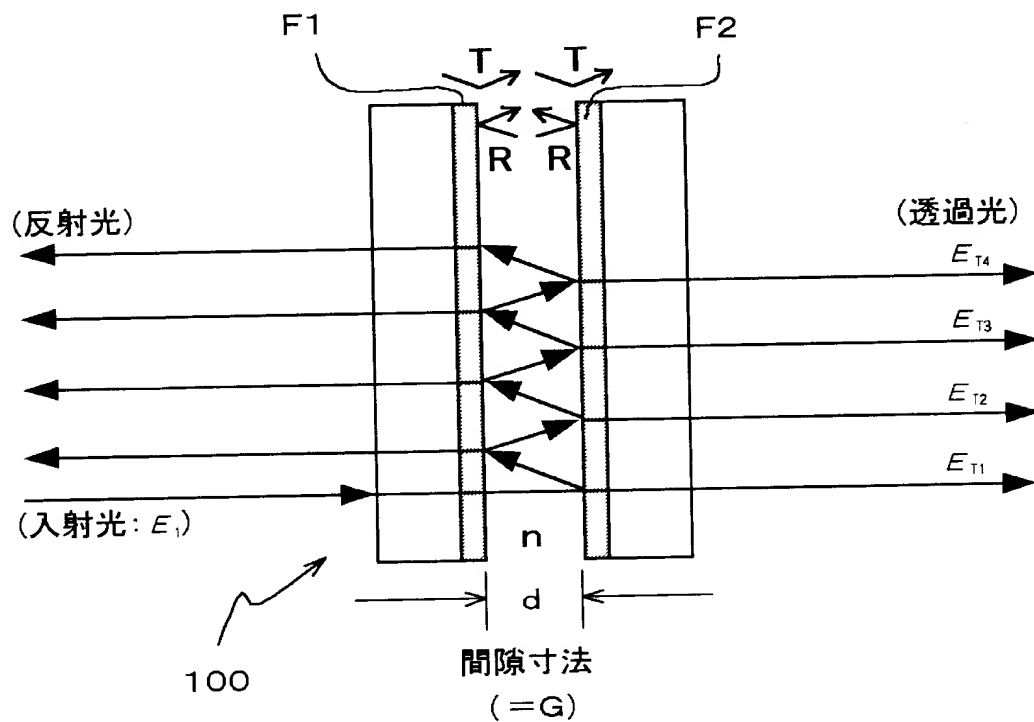
【図11】



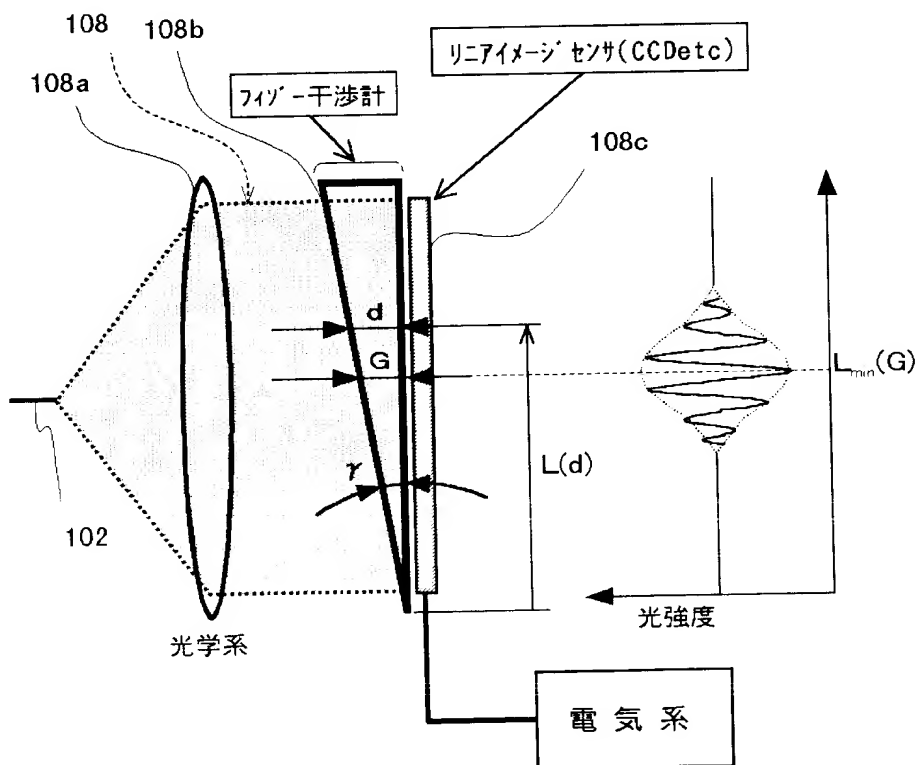
【図12】



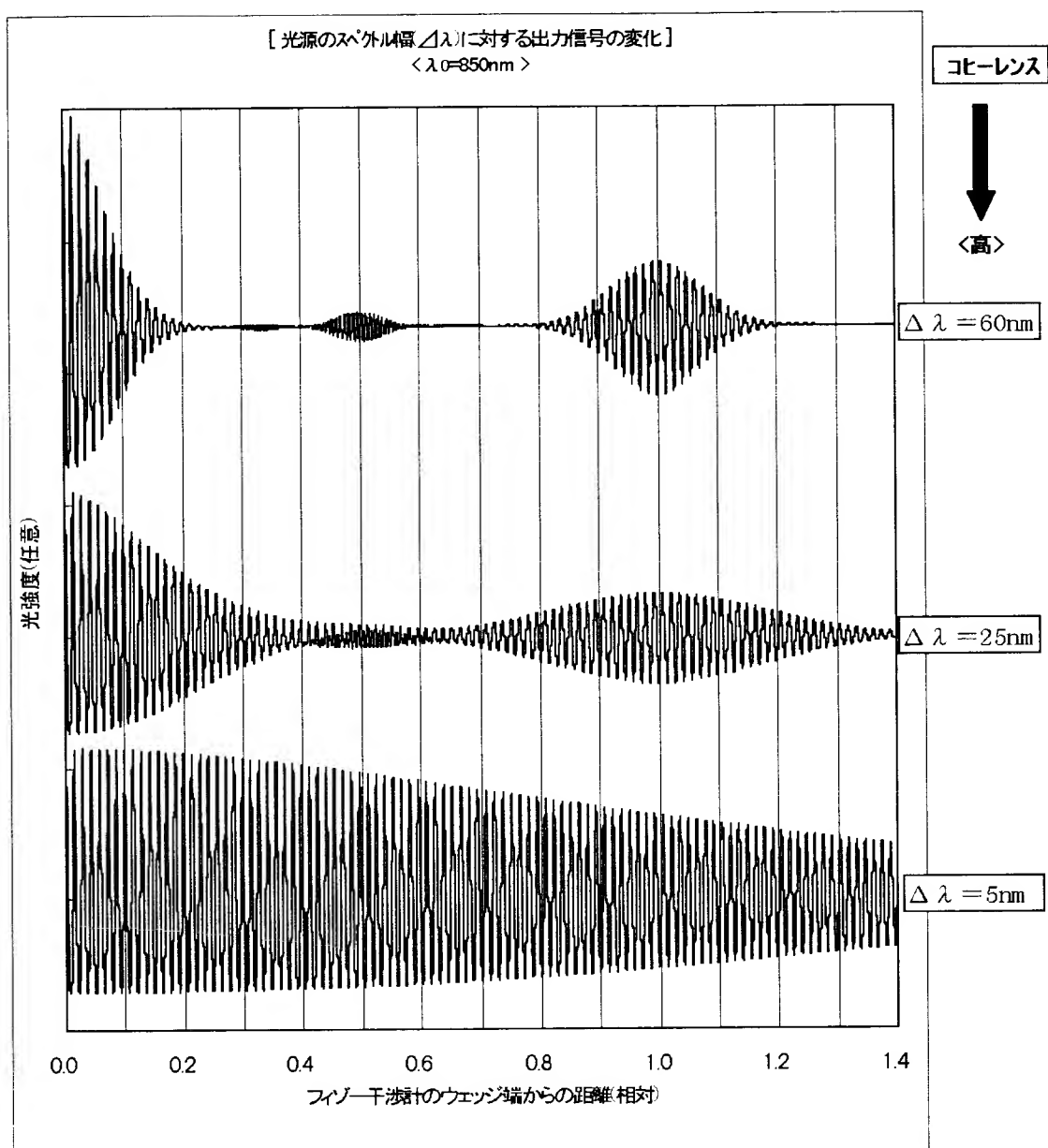
【図13】



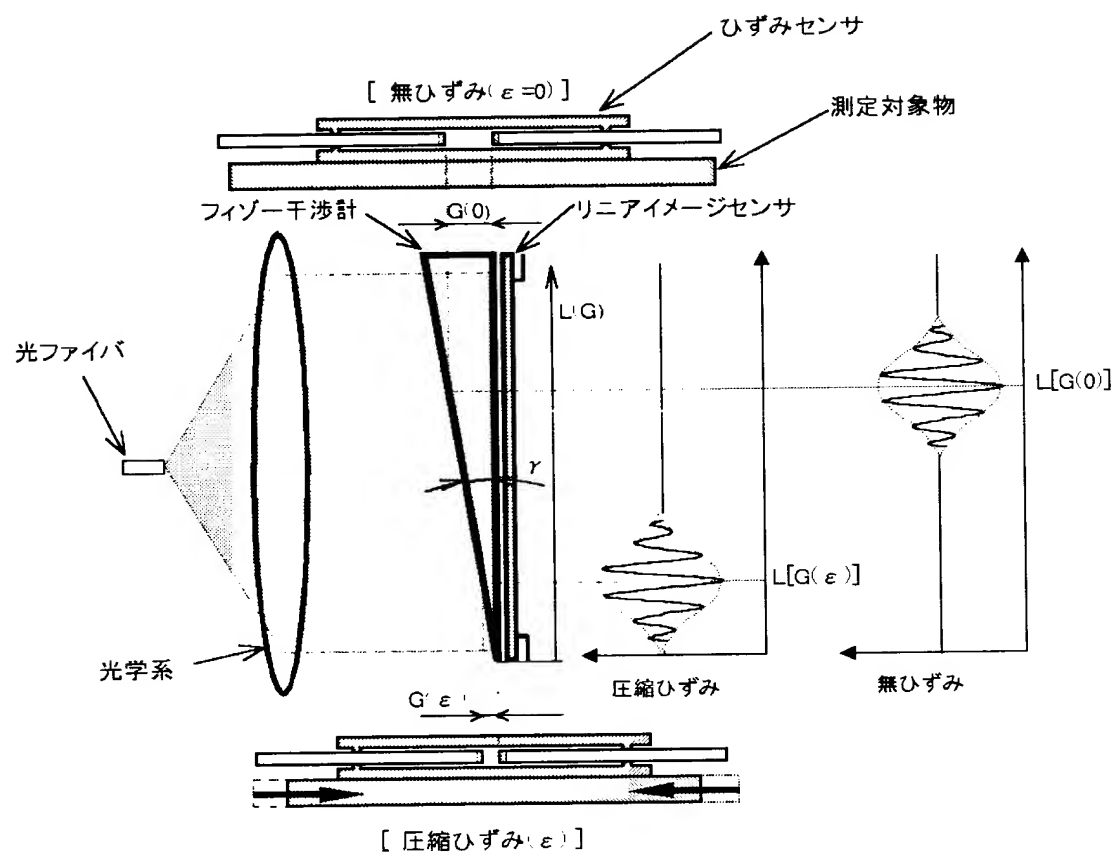
【図14】



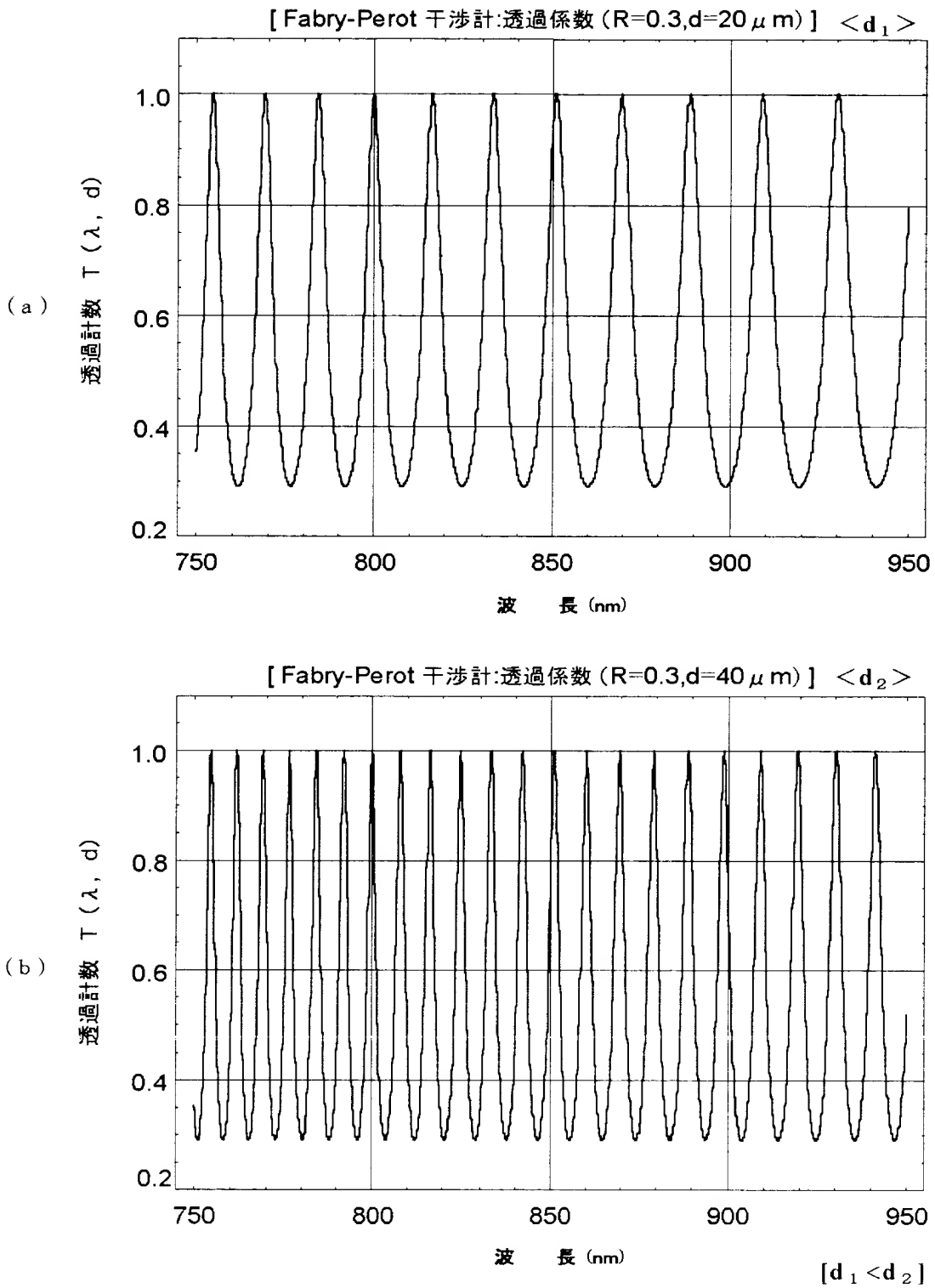
【図 15】



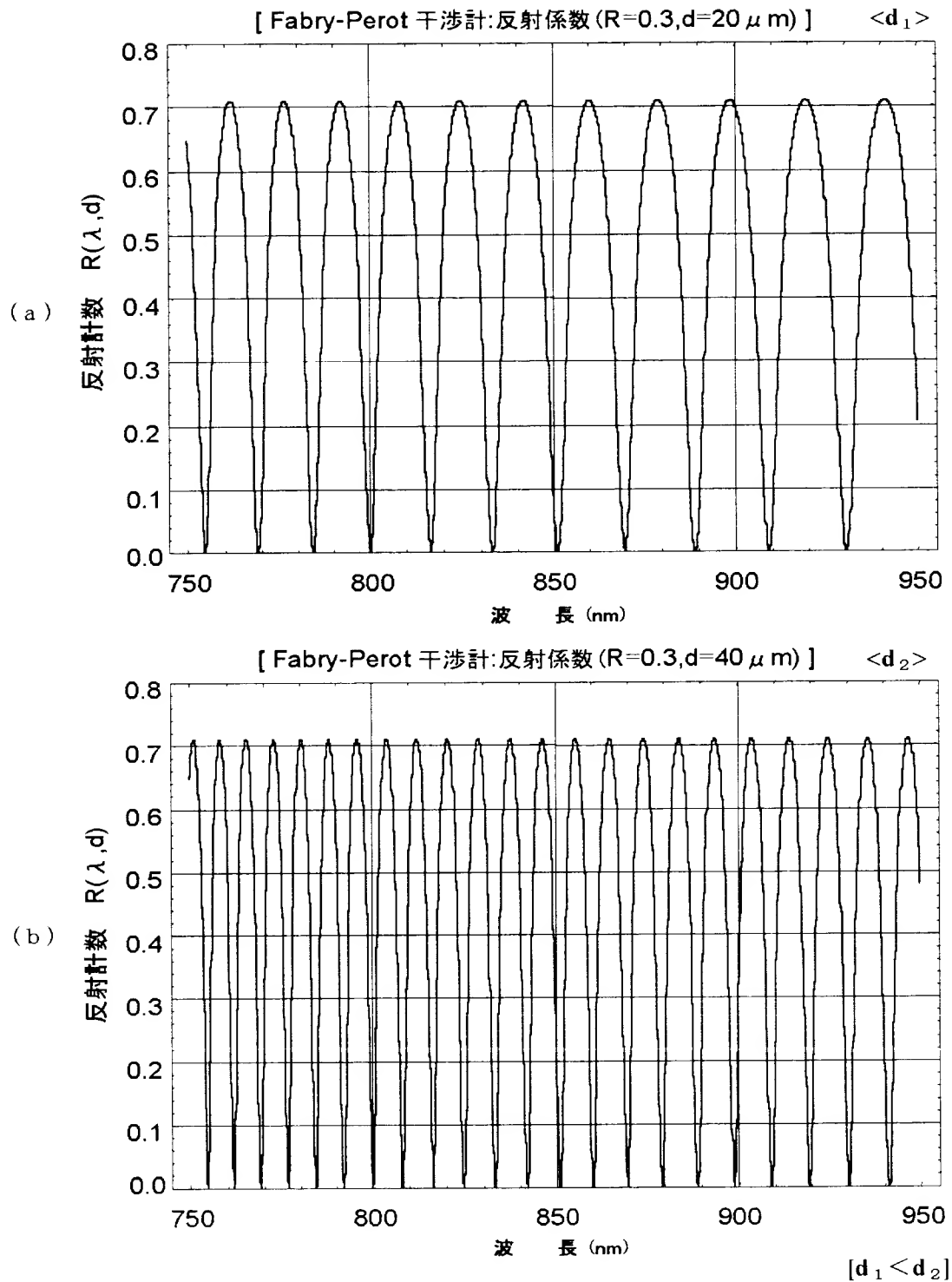
【図 16】



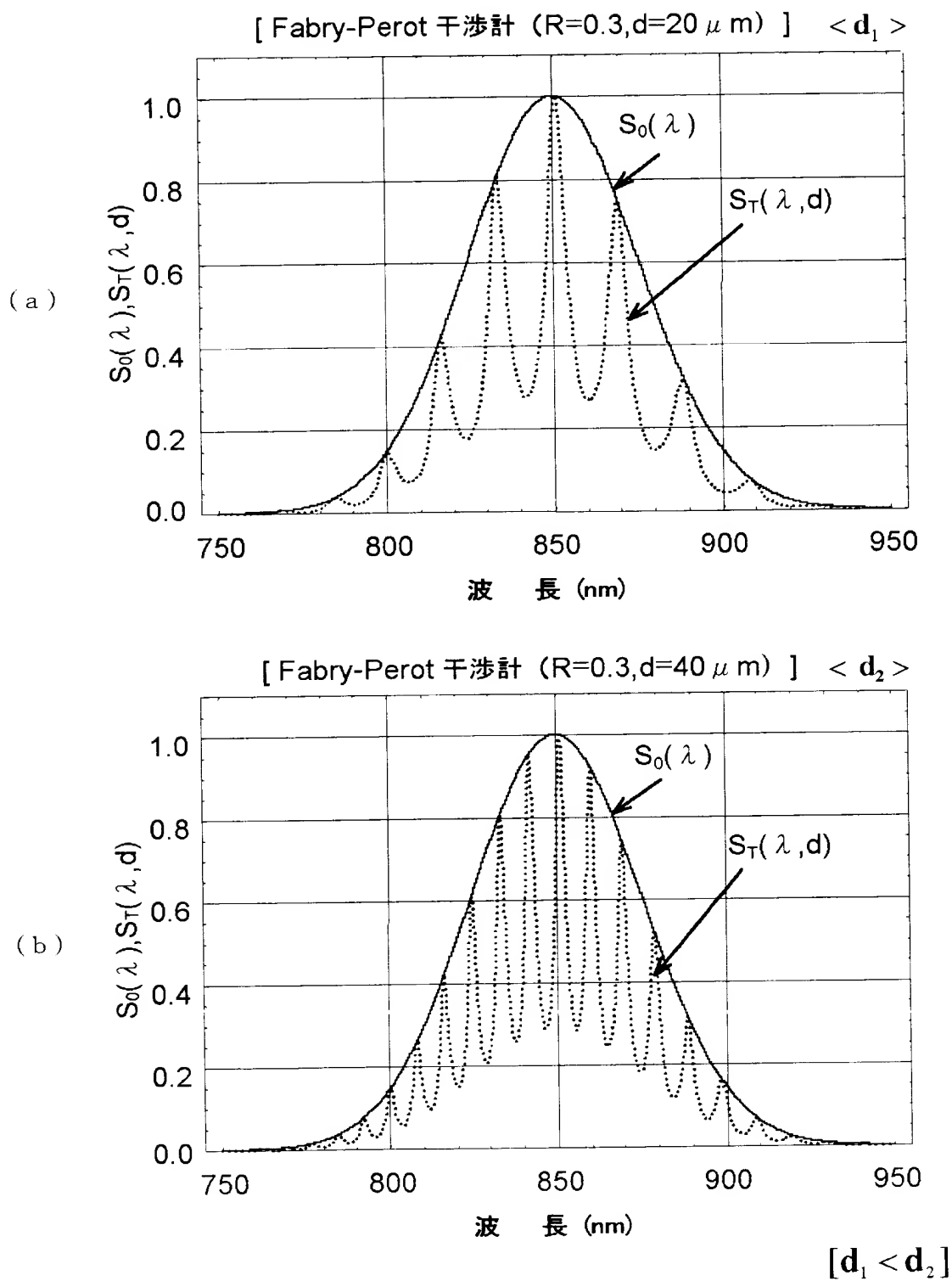
【図 1 7】



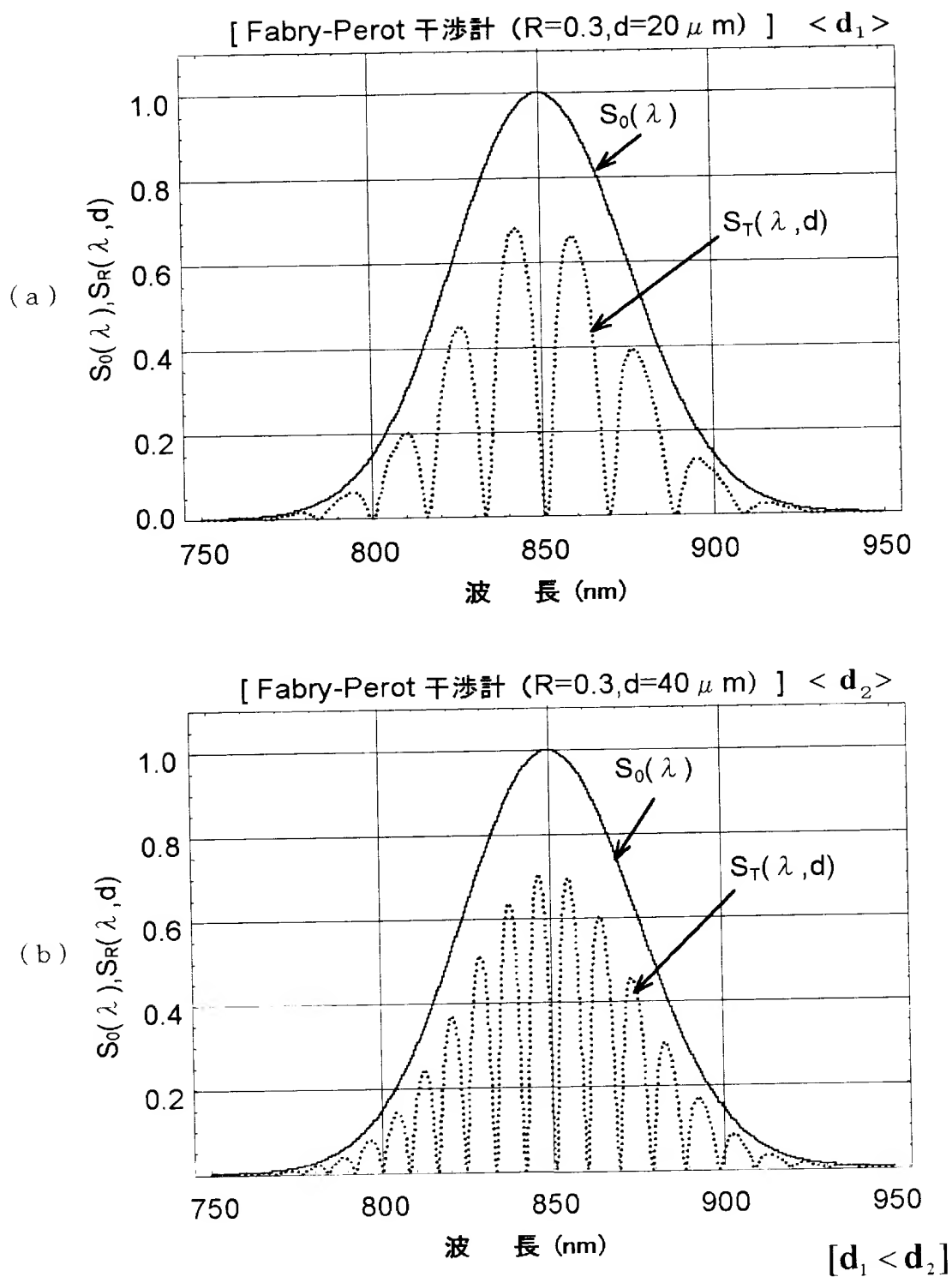
【図 1 8】



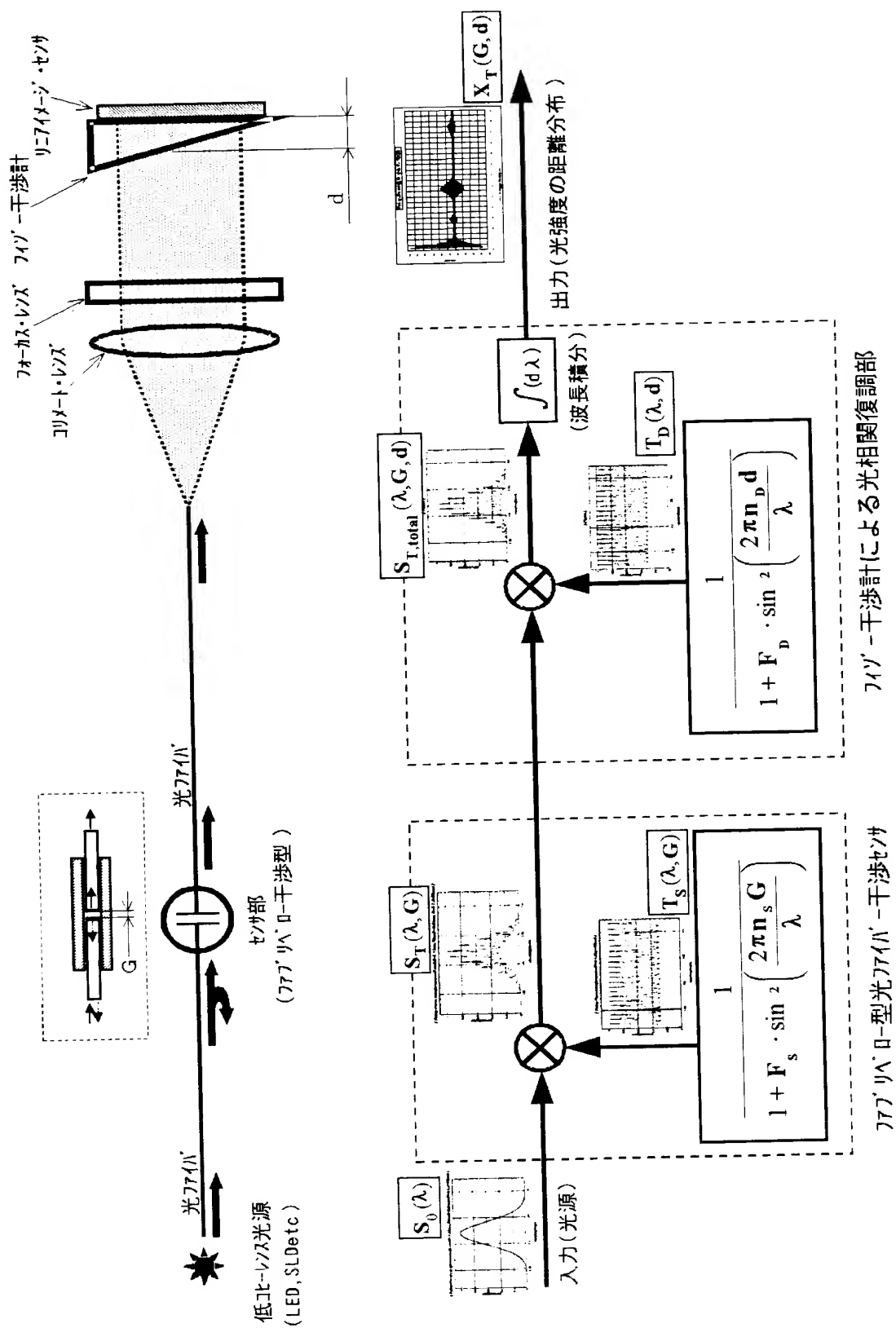
【図 19】



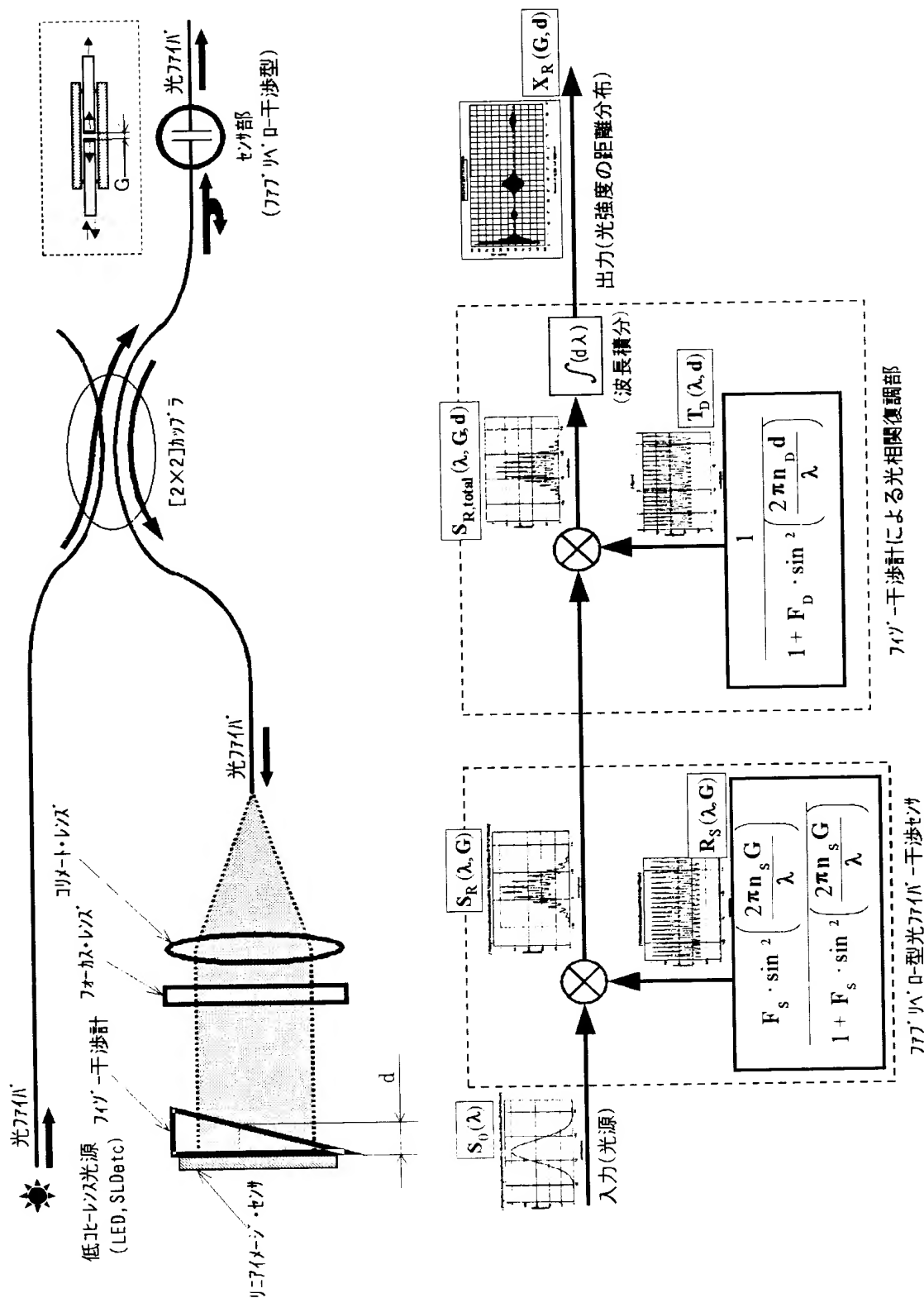
【図 2 0】



【図 2 1】

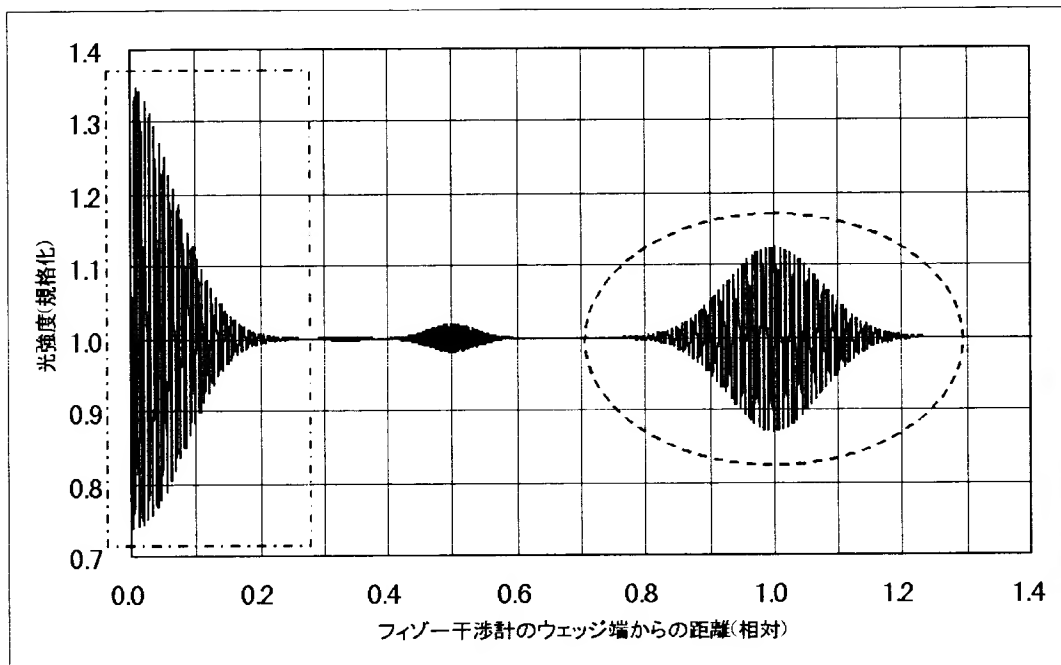


【図 22】

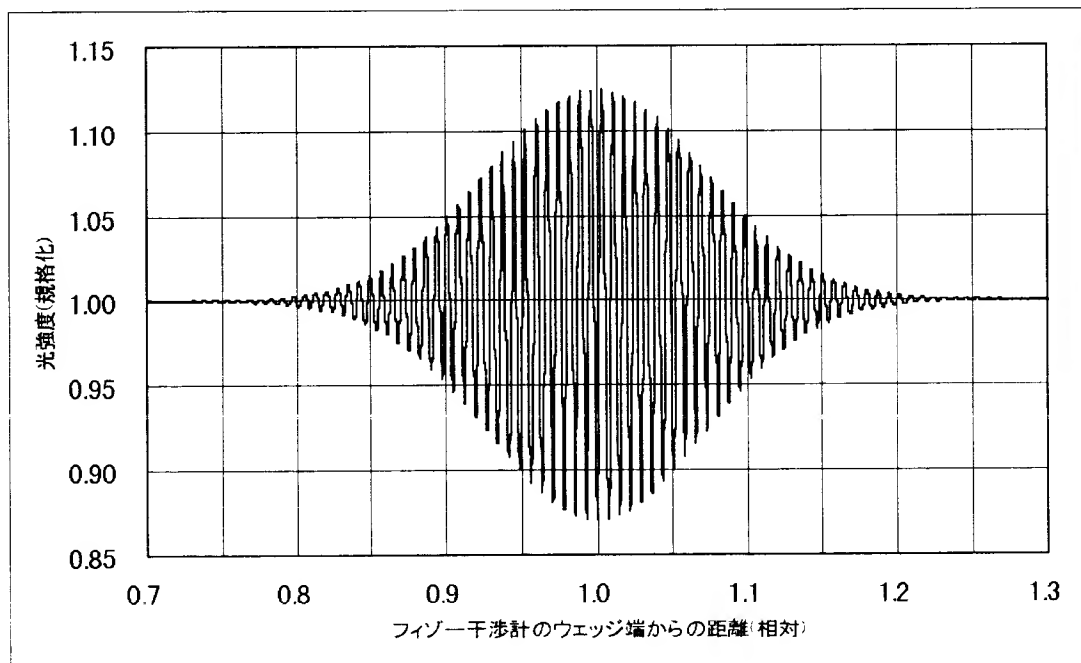


【図 2 3】

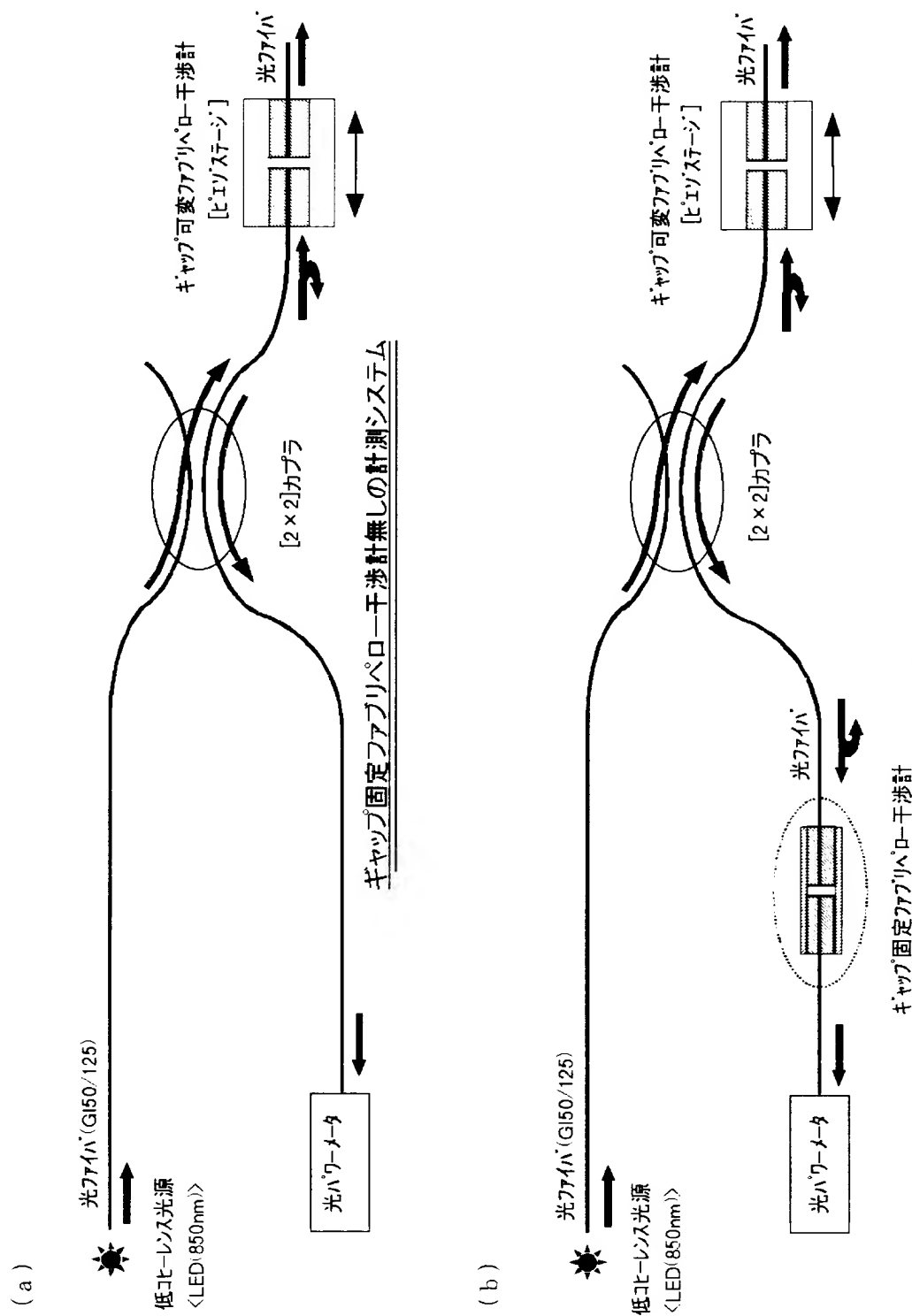
(a)



(b)



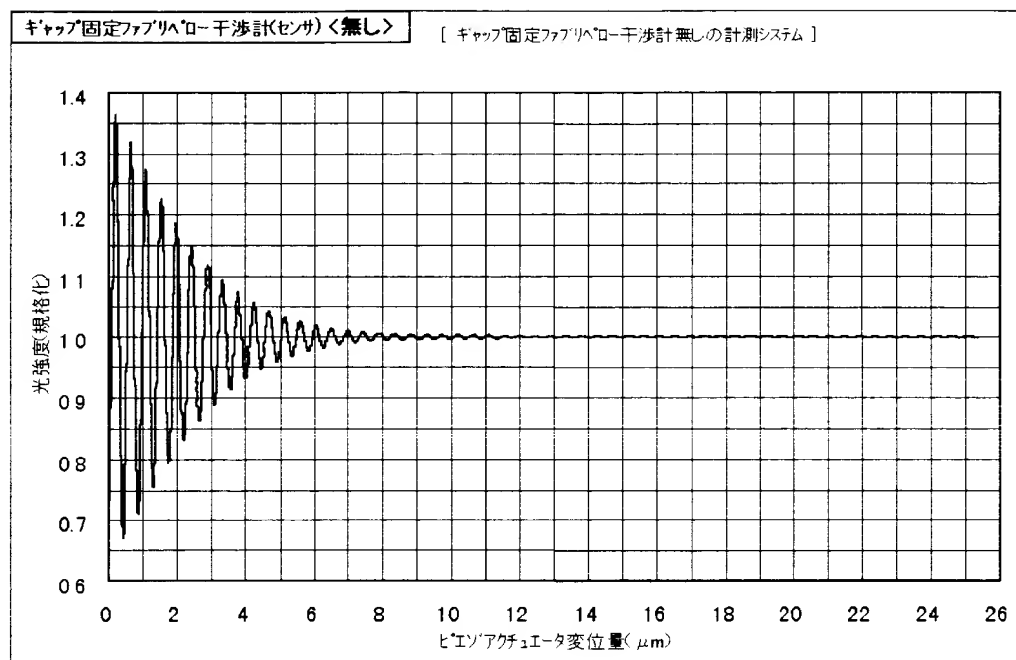
【図 24】



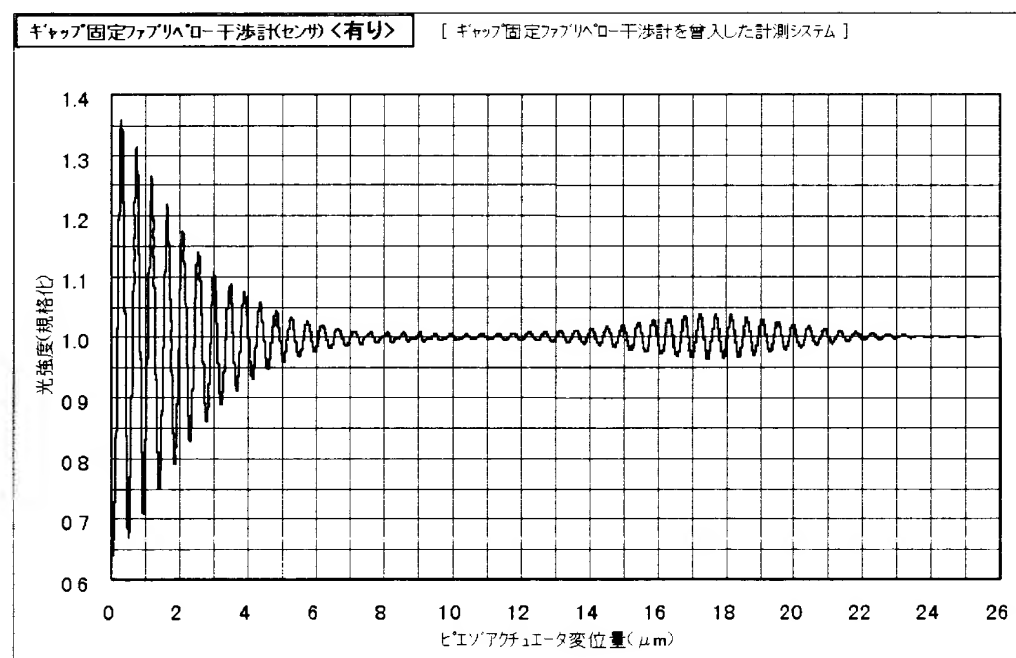
ギャップ固定ファブリペロー干渉計を挿入した計測システム

【図 2 5】

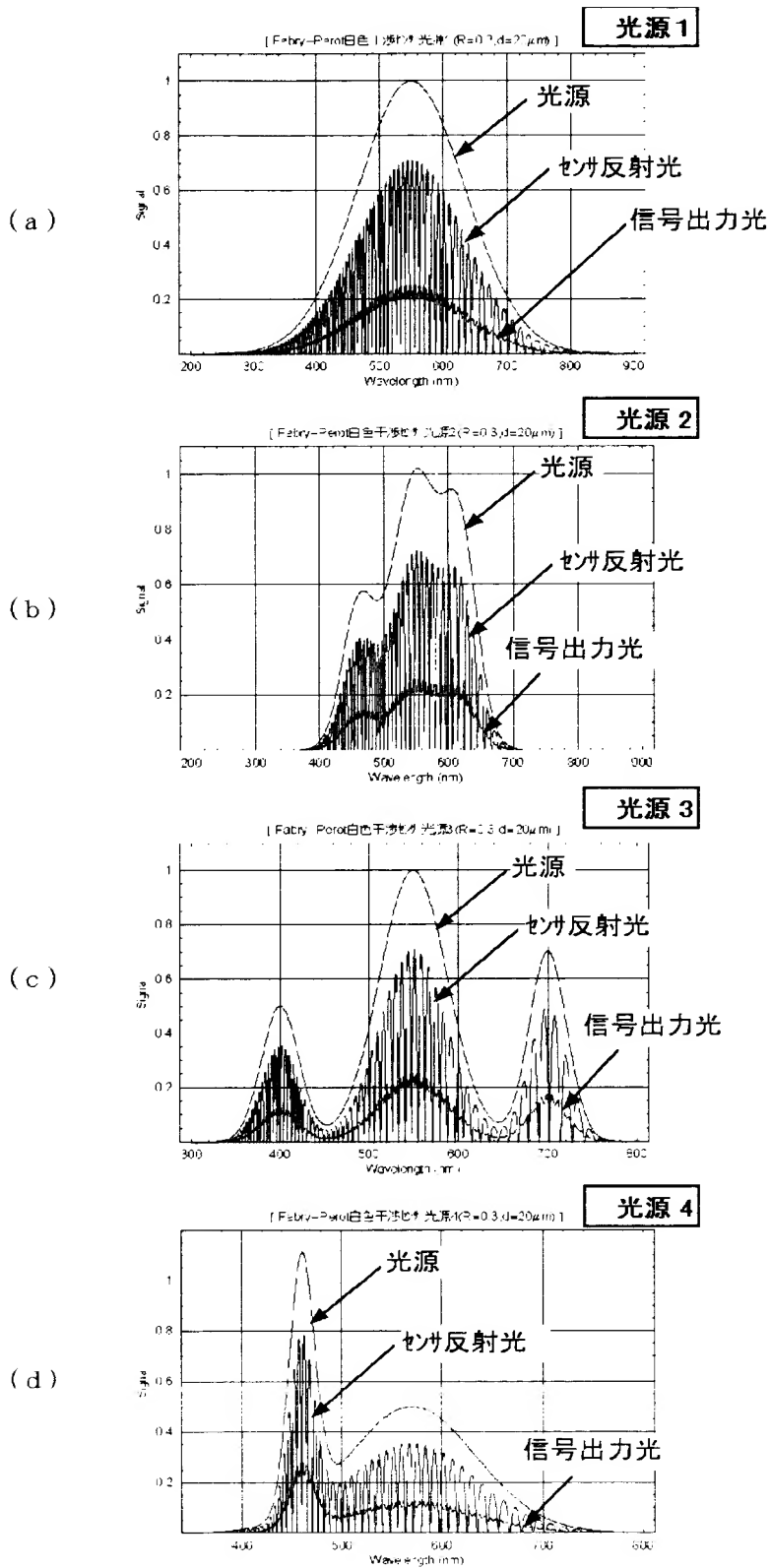
(a)



(b)

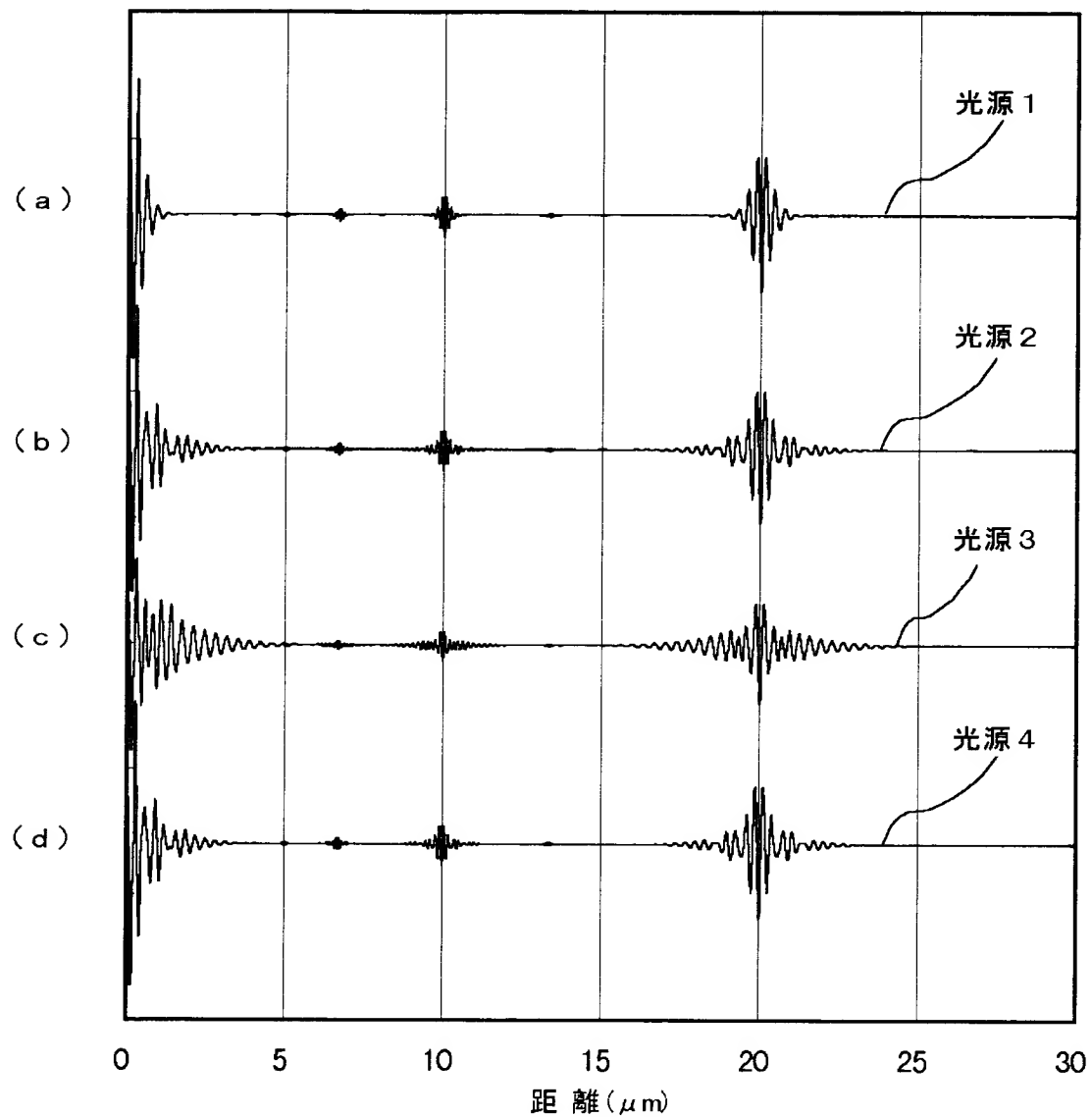


【図 26】



【図 2 7】

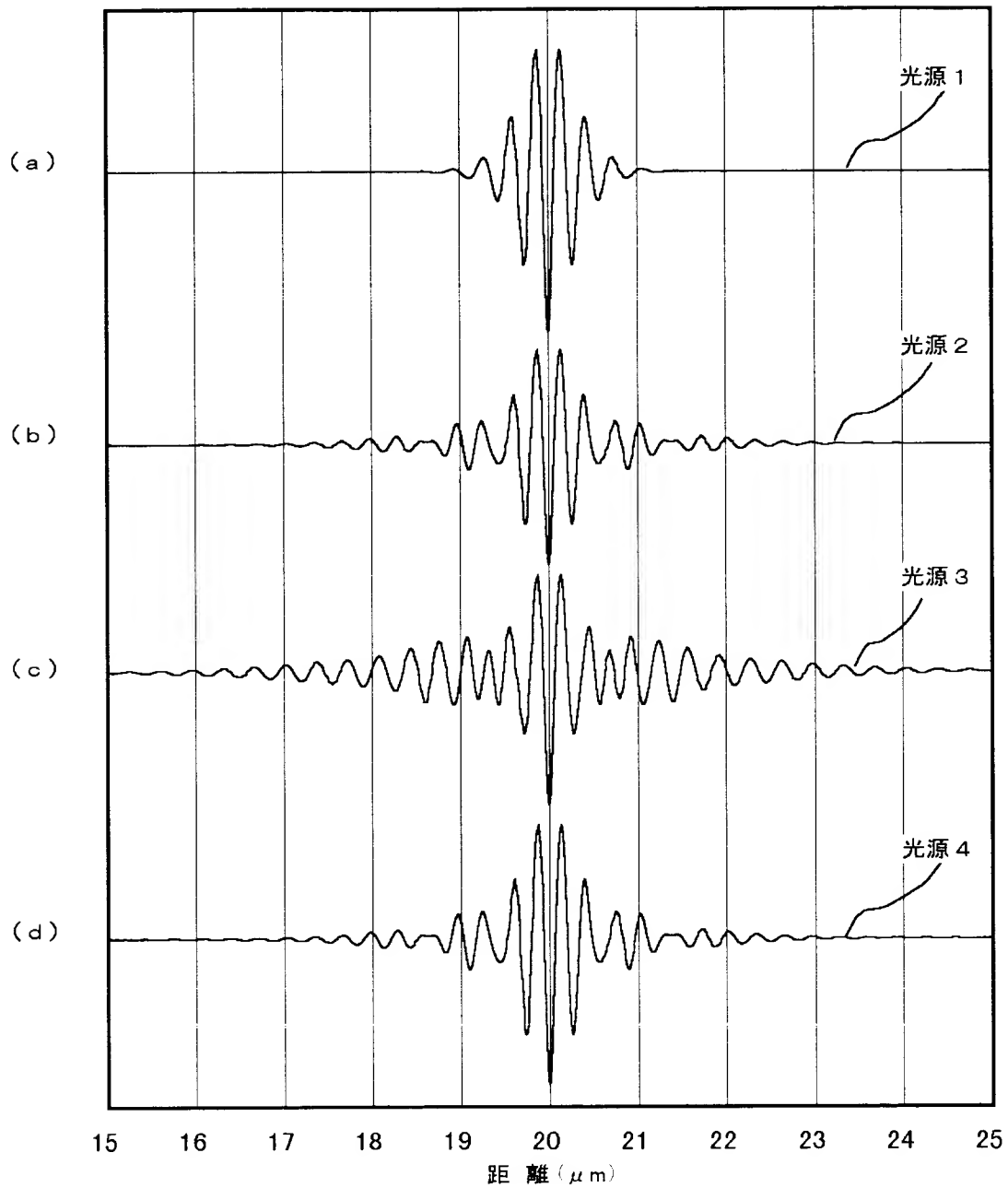
[4つの異なるスペクトル分布を有する光源による出力信号比較シミュレーション]



出力信号比較シミュレーション

【図 2 8】

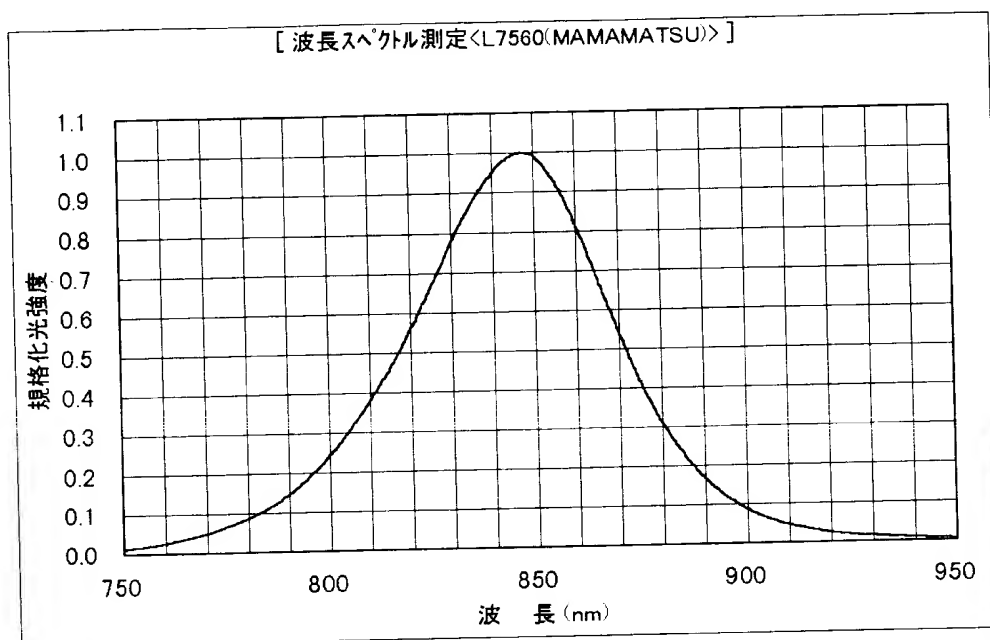
[4つの異なるスペクトル分布を有する光源による出力信号比較シミュレーション]



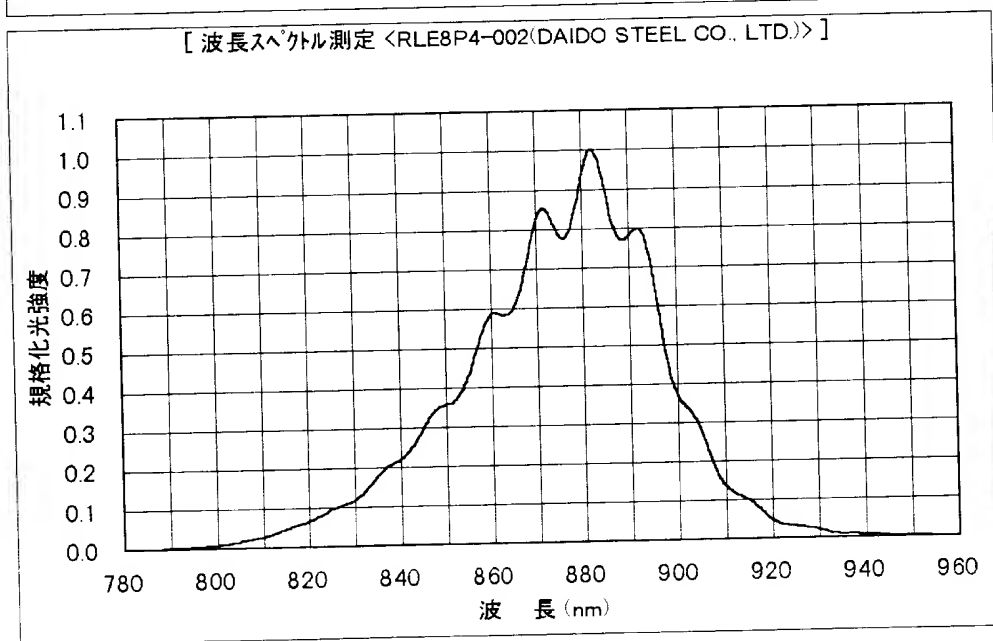
出力信号比較シミュレーション

【図 2 9】

(a)



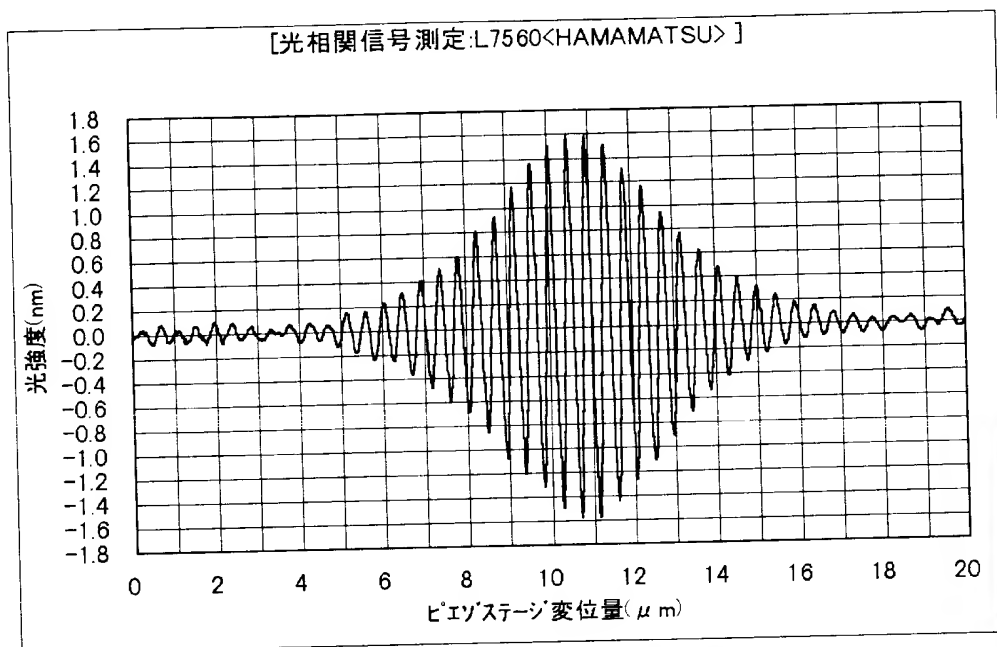
(b)



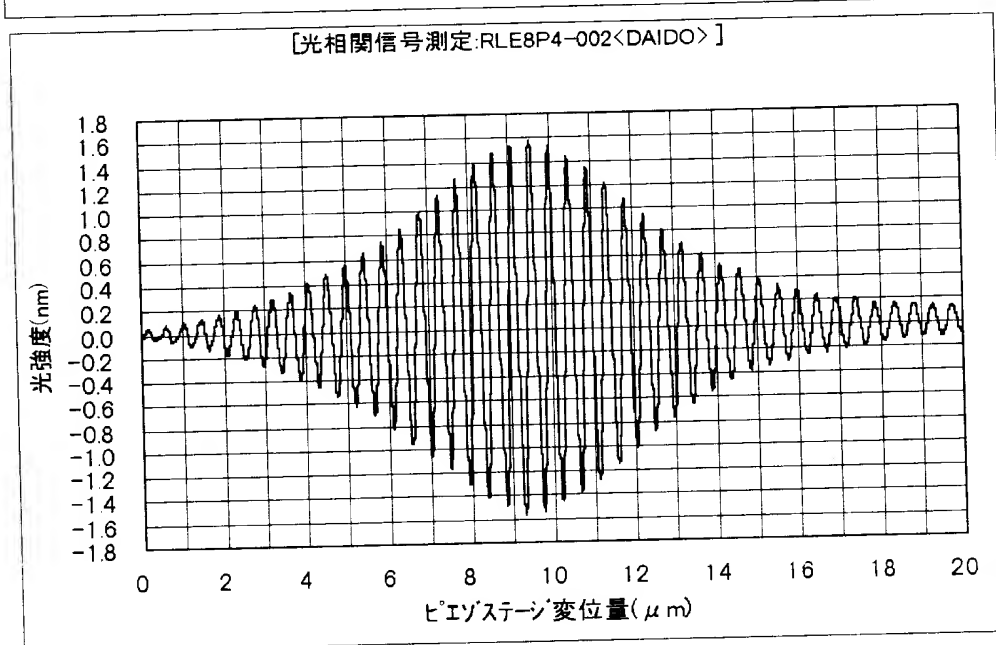
LED光源スペクトル比較

【図30】

(a)



(b)



LED光源:光相関信号比較

【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 簡単な構成で、低周波のゆらぎおよびノイズ等の不要な信号成分による影響を効果的に抑制し、光学系の簡易な調整および検出信号の簡単な信号処理によって、高精度な測定結果を得る。

【解決手段】 広帯域の低コヒーレンス光を発生する光源 1 の光に基づくファブリペロー型ロードセル 6 の波長変調された出力光をギャップ可変ファブリペロー型干渉計 8 に入射させる。ギャップ可変ファブリペロー型干渉計 8 は、ファブリペロー型ロードセル 6 のセンサギャップ間隙近傍で光強度が最小となり、光検出器 9 により光相関信号として検出される。信号処理部 1 2 は、光検出器 9 から光パワーメータ 1 0 および A/D 変換器 1 1 を介して得られる時系列の信号から所要の光相関信号を抽出し、その光相関信号の高周波のノイズ成分をローパスフィルタ処理により除去し、平滑化微分して、該微分値がレベル零と交わる零クロス点を求める。

【選択図】 図 1

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2 0 0 0 - 2 8 4 6 2 4
受付番号	5 0 0 0 1 2 0 2 1 8 5
書類名	特許願
担当官	大畑 智昭 7 3 9 2
作成日	平成 1 2 年 9 月 2 5 日

<認定情報・付加情報>

【特許出願人】

【識別番号】	000142067
【住所又は居所】	東京都調布市調布ヶ丘 3 丁目 5 番地 1
【氏名又は名称】	株式会社共和電業

【代理人】

申請人	
【識別番号】	100082636
【住所又は居所】	東京都港区赤坂 6 丁目 4 番 1 7 号 赤坂コーポ 3 0 6 号
【氏名又は名称】	真田 修治

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000142067]

1. 変更年月日	1990年 8月20日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都調布市調布ヶ丘3丁目5番地1
氏 名	株式会社共和電業